

**EVALUACION DEL PROCESO DE COMPOSTAJE Y DEL COMPOST  
OBTENIDO EN LA PLANTA LOS ARRAYANES DEL MUNICIPIO DE TIMBIO**

**RICARDO DANIEL BRAVO ASTAIZA  
ANA CRISTINA NARVAEZ BOLAÑOS**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACION  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
POPAYAN  
2007**

**EVALUACION DEL PROCESO DE COMPOSTAJE Y DEL COMPOST  
OBTENIDO EN LA PLANTA LOS ARRAYANES DEL MUNICIPIO DE TIMBIO**

**RICARDO DANIEL BRAVO ASTAIZA  
ANA CRISTINA NARVAEZ BOLAÑOS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial  
para optar el título de Químico**

**Directora: M.Sc ISABEL BRAVO REALPE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACION  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
POPAYAN  
2007**

## Nota de Aceptación

---

---

---

Director

---

Isabel Bravo Realpe  
M.Sc.

Jurado

---

Cruz Marina Torres Caicedo  
M.Sc.

Jurado

---

Julio Cesar Gil Solano  
Ingeniero

**Fecha de sustentación: Popayán, 19 de Febrero de 2007**

A mi madre,  
hermanos, sobrino  
y alguien muy especial  
por su apoyo  
en la culminación de  
esta etapa de mi vida.

***KHRISTINNA***

A mi madre y padre,  
por su constante e  
incondicional apoyo,  
comprensión y  
colaboración  
para alcanzar esta meta.

***RICARDO DANIEL***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y a la Virgen por la vida, la sabiduría y por brindarme los medios para seguir adelante y culminar esta etapa.

A mis Padres y especialmente a mi Madre por su apoyo, comprensión y confianza durante toda mi vida.

A mis Hermanos Luis Carlos, Julián Andrés y a mi Sobrino Carlos Ernesto por su cariño y compañía.

A mis amigos por sus consejos, apoyo y gran amistad.

### ***KHRISTINNA***

A Dios y a la Virgen, por darme la salud y la vida sobretodo, para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mi padre y madre, expreso sincera gratitud por su **invariable e ilimitado** apoyo, colaboración, cariño, comprensión, estímulo y consejos durante toda mi vida, que Dios y la Virgen los bendiga.

A mis hermanos José Luis y Bernardo por su colaboración.

A mis compañeros de carrera, Giovanny, Libardo, y Harold por su gran amistad.

### ***RICARDO DANIEL***

A la profesora Isabel Bravo por su constante dedicación, paciencia, colaboración y dirección para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A nuestros jurados, profesora Cruz Marina Torres y profesor Julio Cesar Gil, por sus comentarios, asesoría y motivación para la finalización de este trabajo.

A la profesora Gaby Marcela Muñoz por su colaboración para el desarrollo de este trabajo.

A los profesores del departamento de Química por la formación recibida.

A nuestros compañeros del Laboratorio de Agroquímica por su constante ayuda.

Al Ingeniero Carlos Julio Alegría, Gerente de la Empresa Municipal de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Timbío, por permitir realizar el estudio del proceso de compostaje y del compost preparado en la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos **Los Arrayanes**.

Al administrador de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos **Los Arrayanes**, Luder Collazos, por su colaboración, atención y asesoría en el manejo de residuos sólidos.

Al supervisor de planta, Luis Carlos Hidalgo, y demás operarios por su valiosa colaboración en la preparación del bioabono, determinación de la temperatura y fotografías.

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Composición porcentual de la mezcla de materiales para la elaboración del Compost	49
<b>Tabla 2.</b> Composición Química de los materiales utilizados para la elaboración del Compost	51
<b>Tabla 3.</b> Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora: 8:00 A.M.	53
<b>Tabla 4.</b> Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora: 2:00 P.M.	55
<b>Tabla 5.</b> Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora: 6:00 P.M.	57
<b>Tabla 6.</b> Variación del porcentaje de humedad (base húmeda) en función del tiempo	61
<b>Tabla 7.</b> Variación del pH en función del tiempo	62
<b>Tabla 8.</b> Variación de la Materia Orgánica en función del tiempo	64
<b>Tabla 9.</b> Variación de la relación C/N en función del tiempo	67
<b>Tabla 10.</b> Resultados generales del análisis del Compost	70
<b>Tabla 11.</b> Rendimiento de la Separación Granulométrica del Abono	78
<b>Tabla 12.</b> Composición en MOF y MOH de cada una de las Fracciones del Compost	78
<b>Tabla 13.</b> Composición en MOF y MOH del Compost	79
<b>Tabla 14.</b> Porcentaje de Carbono de los Ácidos Húmicos y la Fracción Fúlvica del compost y valor del Índice de Humificación HR <sub>1</sub>	80
<b>Tabla 15.</b> Conductividad y pH de la Fracción Fúlvica en el proceso de purificación	81
<b>Tabla 16.</b> Resultados de la purificación de los Ácidos Húmicos	82
<b>Tabla 17.</b> Porcentaje de Carbono de Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos purificados y valor del Índice de Humificación HR <sub>2</sub>	83
<b>Tabla 18.</b> Relación E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub> de los Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos purificados	84

## LISTA DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b>	Esquema del Proceso de Compostaje	8
<b>Figura 2.</b>	Composición Química de la Materia Orgánica de un Compost	17
<b>Figura 3.</b>	Formación de los Precusores Húmicos	18
<b>Figura 4.</b>	Proceso de formación de las Sustancias Húmicas	19
<b>Figura 5.</b>	Mapa del Municipio de Timbío: ubicación de La Planta Los Arrayanes	26
<b>Figura 6.</b>	Fotografía de La Planta de tratamiento de residuos sólidos del municipio de Timbío Los Arrayanes	27
<b>Figura 7.</b>	Fotografías de la fuente de Materia Prima utilizada para la elaboración de la pila de Compostaje	27
<b>Figura 8.</b>	Fotografía de recolección de basuras	28
<b>Figura 9.</b>	Fotografía recepción de basuras en La Planta Los Arrayanes	28
<b>Figura 10.</b>	Fotografía de clasificación de basuras en La Planta Los Arrayanes	29
<b>Figura 11.</b>	Fotografía de trituración de basuras en La Planta Los Arrayanes	30
<b>Figura 12.</b>	Fotografía de Apilado	30
<b>Figura 13.</b>	Fotografía de volteo de la pila de Compostaje	31
<b>Figura 14.</b>	Fotografía del Tamizaje	31
<b>Figura 15.</b>	Fotografía del Compost	32
<b>Figura 16.</b>	Fotografía del Empacado	32
<b>Figura 17.</b>	Forma de realizar el muestreo en la pila de Compostaje	33
<b>Figura 18.</b>	Diagrama del método granulométrico para el fraccionamiento de la Materia Orgánica	40
<b>Figura 19.</b>	Diagrama de la extracción de las Sustancias Húmicas	41
<b>Figura 20.</b>	Diagrama de la separación de la Fracción Fúlvica y los Ácidos Húmicos	43
<b>Figura 21.</b>	Diagrama de la purificación de los Ácidos Fúlvicos	44
<b>Figura 22.</b>	Diagrama de la purificación de las Ácidos Húmicos	45
<b>Figura 23.</b>	Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora 8:00A.M.	55
<b>Figura 24.</b>	Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora 2:00 P.M.	57

<b>Figura 25.</b>	Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora 6:00 P.M.	59
<b>Figura 26.</b>	Variación del porcentaje de humedad (base húmeda) en función del tiempo	61
<b>Figura 27.</b>	Variación del pH en función del tiempo	62
<b>Figura 28.</b>	Variación de la Materia Orgánica en función del tiempo	64
<b>Figura 29.</b>	Lixiviados de la pila de Compostaje	67
<b>Figura 30.</b>	Variación de la relación C/N en función del tiempo	68
<b>Figura 31.</b>	Adición de cal agrícola y Hueso incinerado, importantes fuentes de calcio para el Bioabono	76
<b>Figura 32.</b>	Fotografía de los Ácidos Fúlvicos Purificados	82
<b>Figura 33.</b>	Fotografía de los Ácidos Húmicos Purificados	83
<b>Figura 34.</b>	Espectro IR de los Ácidos Fúlvicos M <sub>1</sub>	86
<b>Figura 35.</b>	Espectro IR de los Ácidos Fúlvicos M <sub>2</sub>	87
<b>Figura 36.</b>	Espectro IR de los Ácidos Fúlvicos M <sub>3</sub>	87
<b>Figura 37.</b>	Espectro IR de los Ácidos Húmicos M <sub>1</sub>	89
<b>Figura 38.</b>	Espectro IR de los Ácidos Húmicos M <sub>2</sub>	89
<b>Figura 39.</b>	Espectro IR de los Ácidos Húmicos M <sub>3</sub>	90

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>SH</b>	Sustancias Húmicas
<b>AH</b>	Ácidos Húmicos
<b>AF</b>	Ácidos Fúlvicos
<b>FF</b>	Fracción Fúlvica
<b>C/N</b>	Relación Carbono/ Nitrógeno
<b>M<sub>1</sub></b>	Muestra de la parte superior de la pila de compostaje
<b>M<sub>2</sub></b>	Muestra de la parte media de la pila de compostaje
<b>M<sub>3</sub></b>	Muestra de la parte inferior de la pila de compostaje
<b>IH</b>	Índice de Humificación
<b>MO</b>	Materia Orgánica
<b>MOF</b>	Materia orgánica fresca
<b>MOH</b>	Materia orgánica humificada
<b>FTIR</b>	Infrarrojo con Transformada Rápida de Fourier
<b>UV</b>	Ultravioleta_visible
<b>CIC</b>	Capacidad de intercambio catiónico
<b>FAO</b>	Organización para la Alimentación y la Agricultura
<b>CRC</b>	Corporación regional del Cauca
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub></b>	Relación de densidades ópticas entre 465 y 665 nm

<b>HR<sub>1</sub>, HR<sub>2</sub></b>	Relaciones de humificación
<b>CAH</b>	Carbono de Ácidos Húmicos
<b>CAF</b>	Carbono de Ácidos Fúlvicos
<b>CFF</b>	Carbono de Fracción Fúlvica
<b>C</b>	Carbono
<b>EAA</b>	Espectroscopía de Absorción Atómica
<b>Al</b>	Aluminio
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>P</b>	Fósforo
<b>Na</b>	Sodio
<b>Ca</b>	Cálcio
<b>K</b>	Potasio
<b>Fe</b>	Hierro
<b>Cu</b>	Cobre
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Cl</b>	Cloro
<b>Zn</b>	Zinc
<b>S</b>	Azufre
<b>I</b>	Yodo
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio
<b>KOH</b>	Hidróxido de potasio

<b>NH<sub>4</sub>OH</b>	Hidróxido de amonio
<b>Na<sub>2</sub>HCO<sub>3</sub></b>	Bicarbonato de sodio
<b>Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	Pirofosfato de sodio
<b>Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub></b>	Tetraborato de sodio

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b>
<b>3.1</b>	<b>CLASES DE RESIDUOS</b>
3.1.1	Residuos Municipales
3.1.2	Residuos Agroindustriales
3.1.3	Residuos Pecuarios
3.1.4	Residuos de Cosechas
3.1.5	Residuos Hospitalarios
<b>3.2</b>	<b>COMPOSTAJE</b>
3.2.1	Condiciones Físicas, Químicas y Microbiológicas necesarias para elaborar un Compost
3.2.1.1	Sustrato
3.2.1.2	Contenido de Materia Orgánica
3.2.1.3	Tamaño de Partícula
3.2.1.4	Aireación
3.2.1.5	Mezcla / Volteo
3.2.1.6	Temperatura
3.2.1.7	Humedad
3.2.1.8	Relación Carbono/ Nitrógeno
3.2.1.9	pH
3.2.1.10	Control de Patógenos
<b>3.3</b>	<b>SISTEMAS DE COMPOSTAJE</b>
3.3.1	Sistema Abierto
3.3.1.1	Apilamiento Estático
3.3.2	Sistema Cerrado
<b>3.4</b>	<b>ABONOS ORGÁNICOS</b>
3.4.1	Lombricompost
3.4.2	Gallinaza
3.4.3	Bocashi
<b>3.5</b>	<b>MATERIA ORGÁNICA</b>
3.5.1	Efectos Químicos
3.5.2	Efectos Físicos
3.5.3	Efectos Biológicos
<b>3.6</b>	<b>EXTRACCIÓN DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS</b>
3.6.1	Ácidos Húmicos
3.6.2	Ácidos Fúlvicos
3.6.3	Huminas

<b>3.7</b>	<b>EVALUACIÓN DEL INDICE DE HUMIFICACIÓN</b>	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	26
<b>4.1</b>	<b>UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b>	26
<b>4.2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>	27
4.2.1	Recolección de la Materia Prima	27
4.2.2	Recepción de Materia Prima	28
4.2.3	Clasificación	28
4.2.4	Trituración	29
4.2.5	Apilado	30
4.2.6	Volteo	31
4.2.7	Maduración	31
4.2.8	Tamizaje	32
4.2.9	Empacado	32
<b>4.3</b>	<b>EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>	33
4.3.1	Toma de Muestras	33
4.3.2	Evaluación de parámetros Físicos y Químicos del proceso de Compostaje	34
4.3.2.1	Análisis Físicos	34
•	Temperatura	34
•	Humedad de Campo	34
•	Humedad	34
4.3.2.2	Análisis Químicos	34
•	pH	35
•	Determinación de la Materia Orgánica	35
•	Determinación de Nitrógeno por el Método de Kjeldahl	35
•	Relación C/N	36
<b>4.4</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y GRADO DE MADUREZ DEL COMPOST</b>	36
4.4.1	Análisis Físicos	37
4.4.1.1	Humedad de Campo	37
4.4.1.2	Humedad	37
4.4.1.3	Densidad	37
4.4.1.4	Capacidad de Retención de Agua	37
4.4.1.5	Conductividad Eléctrica	38
4.4.1.6	Pérdidas por Volatilización	38
4.4.2	Análisis Químicos	38
4.4.2.1	Contenido de Carbono Orgánico	38
4.4.2.2	Contenido de Nitrógeno Total	38
4.4.2.3	Relación C/N	38
4.4.2.4	Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico	39
4.4.2.5	Determinación de Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y	39

	Microelementos	
<b>4.5</b>	<b>EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN</b>	<b>39</b>
4.5.1	Separación de las Fracciones de la Materia Orgánica	40
4.5.2	Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost y determinación del Índice de Humificación HR <sub>1</sub>	41
4.5.3	Purificación de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos y determinación del Índice de Humificación HR <sub>2</sub>	44
4.5.4	Determinación de la relación de densidades ópticas entre 465 y 665nm. (Relación E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub> )	47
4.5.5	Espectroscopía infrarroja IR de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos	47
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LA MEZCLA DE MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL COMPOST</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>	<b>53</b>
5.2.1	Temperatura	53
5.2.2	Humedad	61
5.2.3	pH	62
5.2.4	Materia Orgánica	64
5.2.5	Relación C/N	67
<b>5.3</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y GRADO DE MADUREZ DEL COMPOST</b>	<b>68</b>
5.3.1	Análisis Físicos y Químicos del Compost Maduro	69
5.3.1.1	Análisis de las propiedades Físicas	71
	• Humedad en Base Seca	71
	• Conductividad Eléctrica	71
	• Densidad	71
	• Porcentaje de Saturación o Capacidad de Retención de Agua	72
	• Pérdidas por Volatilización	72
5.3.1.2	Valoración de las propiedades Químicas	72
	• pH	72
	• Materia Orgánica	73
	• Nitrógeno	73
	• Capacidad de Intercambio Catiónico	74
	• Contenido de Fósforo	74
	• Contenido de K <sub>2</sub> O	75
	• Contenido de CaO	75
	• Contenido de MgO	76
	• Contenido de Na	76

•	Microelementos	77
5.3.2	Evaluación del Grado de Humificación	77
5.3.2.1	Separación y Análisis de las Fracciones de la Materia Orgánica	78
5.3.2.2	Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost y determinación del Índice de Humificación HR <sub>1</sub>	79
5.3.2.3	Purificación de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos y determinación del Índice de Humificación HR <sub>2</sub>	80
5.3.2.4	Determinación de la relación de densidades ópticas entre 465 y 665nm (Relación E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub> )	84
5.3.2.5	Análisis IR de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos	85
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	92
	<b>RECOMENDACIONES</b>	94
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	95

## RESUMEN

En el municipio de Timbío, desde el año de 1998, debido al problema de contaminación generado por la gran cantidad de residuos sólidos se construyó una planta de tratamiento para residuos, con el fin de obtener mediante el proceso de compostaje, bioabonos que constituyen un recurso útil para el sector agropecuario local. El compostaje se define como un proceso de degradación oxidativa de Materia Orgánica (MO) presente en los residuos, llevado a cabo por microorganismos con el fin de obtener bioabonos con Materia Orgánica (MO) estable. La evaluación del proceso de compostaje y del compost obtenido en la planta los Arrayanes del municipio de Timbío, pretende contribuir con la optimización del proceso para darle un valor agregado con resultados que permitan obtener posteriormente una licencia para su respectiva comercialización.

La evaluación del proceso de compostaje llevado a cabo con los residuos de la plaza de mercado de Timbío (C), se realiza mediante la valoración de diferentes parámetros físicos y químicos, así como la evaluación de la madurez del compost obtenido, realizando análisis físicos y químicos que comprenden: humedad, densidad, capacidad de retención de agua, conductividad, pérdidas por calcinación, cenizas, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, relación Carbono/ Nitrógeno (C/N), contenidos de carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y micronutrientes, por métodos químicos y espectroscópicos. Además se determinan algunas propiedades estructurales y funcionales de los componentes similares al humus determinando la relación  $E_4/E_6$ , algunos índices de humificación (HR) como  $HR_1 = \%C \text{ Ácidos Húmicos (AH)} / \%C \text{ Fracción Fúlvica (FF)}$  y  $HR_2 = \%C \text{ Ácidos Húmicos (AH)} / \%C \text{ Ácidos Fúlvicos (AF)}$ . Todos estos parámetros se evalúan aplicando la metodología estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca y parámetros técnicos establecidos por ICONTEC en la NORMA DE-204/02 así como parámetros científicos establecidos por la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas (SH).

Con base en los resultados obtenidos y según la norma ICONTEC, se clasifica el producto como un abono o fertilizante orgánico, que presenta adecuados parámetros físicos y químicos, y es fuente importante de macronutrientes como nitrógeno(N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y microelementos como cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn) indispensables para el suelo y las plantas. Además presenta deficiencias en magnesio.

Las relaciones  $E_4/E_6$  y los espectros Infrarrojo con Transformada Rápida de Fourier (FTIR) de AF y AH sugieren que estos materiales tienen alto grado de humificación, indicando que en los AF predominan las cadenas alifáticas y para los AH estructuras aromáticas. Sin embargo, el tiempo de compostaje no es adecuado puesto que prevalece la mineralización sobre la humificación <sup>(1)</sup>.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente producción de residuos en general compromete la disponibilidad de superficies de vertido suficientes en condiciones ambientales aceptables. Uno de los mayores problemas que tiene la sociedad actual es precisamente la gestión de los residuos sólidos. La galería municipal del municipio de Timbío (Cauca) produce alrededor de 9 toneladas de residuos orgánicos semanalmente, los cuales se deben disponer adecuadamente a fin de aprovechar este recurso y evitar problemas ambientales. La compostación es una técnica ambiental deseable en el manejo de estos residuos. Este proceso es la conversión biológica de desechos orgánicos para obtener un producto (el compost) higienizado, rico en humus, relativamente estabilizado que mejore las condiciones del suelo y que sirva de fertilizante a las plantas. Estas características se logran a través de procesos biológicos, físicos y químicos que ocurren durante la compostación, que hacen de éste un sistema ecológico y dinámico, donde los cambios químicos están definidos por las condiciones del proceso y la calidad del material inicial en interacción con la comunidad biótica. Si tales características no se alcanzan los compost permanecen inmaduros, con sus problemas asociados como: olores, contaminación ambiental, presencia de insectos nocivos y fitotoxicidad del suelo.

El uso de los composts inmaduros pueden generar riesgos tales como: disminución de la concentración de oxígeno en la zona radical; residuos con elevada relación C/N que produce inmovilización del nitrógeno, generando una competencia por éste en el suelo entre los microorganismos y las plantas, aumento de la temperatura del suelo, lo que es incompatible con el desarrollo vegetal; acumulación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular y de otros metabolitos orgánicos que son fitotóxicos; destrucción incompleta de organismos patógenos, como consecuencia de una compactación o una mala aireación de los residuos durante el compostaje.

Durante el proceso de compostaje efectuado en la Planta **Los Arrayanes** en el municipio de Timbío, para el tratamiento de los residuos de galería, no se hace un análisis del seguimiento y un control de calidad del proceso de compostaje y del compost obtenido. Por lo tanto, no se conoce el tipo de efecto que esté causando el compost obtenido en las condiciones actuales sobre el suelo o los distintos compartimientos ambientales, generando incertidumbre relacionada con los riesgos ambientales inherentes.

De acuerdo a lo anterior nos podemos plantear que mediante la evaluación del proceso de compostaje y del compost obtenido en La Planta **Los Arrayanes** del municipio de Timbío, con base en el análisis de parámetros biológicos, físicos y químicos, se pretende determinar el grado de madurez que presenta el bioabono que se está comercializando en las actuales condiciones, con el fin de contribuir en el mejoramiento del proceso. Además aprovechando la técnica Bocashi actualmente utilizada en la Planta, se pretende contribuir a su optimización, para utilizar de forma más eficiente los residuos, minimizando con ello, riesgos ambientales y sanitarios que se puedan estar generando actualmente.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso utilizado en el tratamiento de los residuos de galería en la Planta Los Arrayanes, para conocer la calidad de los bioabonos obtenidos y concluir si presentan una adecuada madurez, con el propósito de contribuir a su optimización y a la minimización de riesgos ambientales y sanitarios que se están generando actualmente.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar si el proceso de compostaje es apropiado para obtener un compost maduro, con base en el seguimiento de parámetros físicos y químicos como temperatura, pH, humedad, contenido de Materia Orgánica (MO) y relación C/N.
- Aislar y purificar los Ácidos Húmicos (AH) y Ácidos Fúlvicos (AF) provenientes de la Materia Orgánica Humificada (MOH) presente en el bioabono.
- Evaluar la calidad y grado de madurez del compost de acuerdo a los índices de humificación  $HR_1$  y  $HR_2$ , a la relación de densidades ópticas relación ( $E_4/E_6$ ) y espectroscopía Infrarroja de los Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos.
- Evaluar la calidad del bioabono de acuerdo a parámetros técnicos establecidos por ICONTEC en la NORMA DE-204/02 y parámetros científicos establecidos por la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas (SH).
- Determinar si el bioabono presenta deficiencias en los diferentes nutrientes: Nitrógeno(N), Fósforo(P), Potasio(K), Magnesio(Mg), Cobre(Cu), Zinc(Zn), Hierro(Fe), Manganeso(Mn) y Carbono(C), para concluir si es necesario formularlo con su respectiva fuente.
- Valorar el proceso desde el punto de vista físico y químico, para determinar el tipo de impacto ambiental, ecológico y social causado por el tratamiento de estos residuos, en pro del cuidado y preservación de nuestro medio ambiente, los recursos naturales y la calidad de vida de una comunidad.

### **3. FUNDAMENTO TEORICO**

Colombia tiene en el sector agropecuario una de las principales bases de su economía. Entre los insumos más ampliamente utilizados para la producción agrícola se encuentran los fertilizantes minerales, que cada vez son demandados en mayores cantidades dado el deterioro continuado de los suelos, causado por problemas de salinización, acidificación, erosión y problemas de contaminación. A su vez la utilización de altas cantidades de fertilizantes produce más acidez al suelo causando daños en su bioestructura, así como erosión continuada.

En nuestro departamento y especialmente en el municipio de Timbío se genera una alta cantidad de residuos o desechos sólidos provenientes del casco urbano y las zonas rurales que en ocasiones son lanzados a los cuerpos de agua o al suelo produciendo contaminación en todas las fases ambientales.

Sin embargo, estos residuos presentan Materia Orgánica (MO) que puede ser biodegradable, es decir transformada adecuadamente por microorganismos para obtener recursos útiles para el sector agropecuario y a su vez contribuyen al menos parcialmente a la descontaminación ambiental. <sup>(2)</sup>

Varias entidades entre ellas la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los ministerios de agricultura y del medio ambiente, establecen gran importancia al tema del reciclaje de la MO en la agricultura. En un contexto de crisis de recursos energéticos tradicionales y alimenticios, los residuos orgánicos a través del reciclaje constituyen una fuente renovable de energía. Por otra parte frente a los altos costos de fertilizantes químicos, el uso de materiales orgánicos como fuente de mejoramiento de la productividad del suelo, adquiere gran importancia. Es necesario, por lo tanto contribuir a cambiar el concepto según el cual los desechos y residuos orgánicos son una carga que debe ser eliminada y promover en cambio una concepción que los considere como recurso valioso para ser aprovechado en el sector agropecuario de diferentes maneras mediante el reciclaje.

#### **3.1. CLASES DE RESIDUOS**

Existen diferentes clases de residuos. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

### **3.1.1. Residuos Municipales**

Son residuos tales como los generados en domicilios particulares, comercio, oficina y servicios, así como todos aquellos que no tengan clasificación de peligrosos y por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades. Entre ellos se distinguen:

- Los procedentes de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
- Los procedentes de mercados, ferias, festejos o actos similares.
- Los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.
- Los muebles y enceres desechados (voluminosos).
- Los animales domésticos muertos.
- Los vehículos abandonados.

Salvo algunas excepciones, la mayoría de las ciudades de nuestro país no cuentan con programas de aprovechamiento de basuras. El alto volumen de generación de estos desechos implica pensar en su reciclaje. La contaminación ambiental derivada de la acumulación de basuras en rellenos sanitarios genera cantidades apreciables de gas que conlleva a catástrofes tales como la ocurrida hace algunos años con el relleno de doña Juana en Bogotá. <sup>(3)</sup>

### **3.1.2. Residuos Agroindustriales**

Se entiende por residuos agroindustriales cualquier material que proviene de un proceso agroindustrial entre los cuales se encuentran subproductos de caña, café, cacao, fique, etc. De fábricas de papel, de azúcar y de alcohol, cuyos subproductos han recibido una mayor atención en cuanto a su aprovechamiento. El potencial futuro de estos desechos como recursos para el reciclaje orgánico puede alcanzar volúmenes muy considerables en la región. <sup>(3)</sup>

### **3.1.3. Residuos Pecuarios**

Los desechos de las explotaciones pecuarias incluyen las excretas fecales y urinarias de animales, desperdicios de alimento y las aguas de lavado más las pérdidas involuntarias de ésta y otros materiales como pajas y aserrines usados como "cama". Por lo tanto, los potenciales contaminantes, producto de la explotación animal, son todos de origen orgánico.

El carácter orgánico de los desechos pecuarios permite que éstos se puedan incorporar a las cadenas y ciclos del nitrógeno y del carbono en la naturaleza, por lo que, bien usados constituyen una fuente potencial de riqueza. Por lo tanto, los desechos de las explotaciones pecuarias impactan en el medio en función del enriquecimiento de éste con sus elementos constitutivos: nitrógeno(N), algunos elementos minerales, como Fósforo (P) y Potasio (K) y la demanda de oxígeno relacionada con el contenido de MO. Los excesos vertidos al medio provocan un desequilibrio y éste genera contaminación. <sup>(4)</sup>

### **3.1.4. Residuos de Cosechas**

Son los materiales que quedan después de recoger el producto principal del cultivo. Entre los más abundantes se encuentran: Los residuos de cosecha del maíz como: cascarón, capacho y mata seca o rastrojo, de la yuca como: hojas tallos, del frijol como: hojas, vainas y tallos tiernos, del café como: la cascarilla.

Los residuos de cosecha son generados en grandes volúmenes y generalmente se acumulan o lanzan a los ríos causando contaminación originada por la MO que no ha sido transformada adecuadamente. <sup>(5)</sup>

### **3.1.5. Residuos Hospitalarios**

Actualmente el manejo de los residuos hospitalarios no es el más apropiado, en algunos sitios, puesto que no se aplica el debido reglamento. A nivel de hospital los residuos son generalmente esterilizados.

La composición de los residuos hospitalarios varía desde el residuo tipo residencial y comercial a residuos de tipo médico conteniendo sustancias peligrosas.

De los residuos mencionados anteriormente, los municipales, agroindustriales, pecuarios y de cosechas contienen apreciables cantidades de MO, minerales y otras sustancias que pueden ser biotransformadas mediante sistemas enzimáticos presentes en la microflora consumidora de materiales compostables como hongos, actinomicetos y bacterias de diferentes clases, existen diferentes métodos para transformar estos residuos, entre ellos el más importante es el compostaje. <sup>(6)</sup>

### 3.2. COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso de descomposición biológica oxidativa en el que intervienen numerosos y variados microorganismos que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos constituyentes de los materiales de desecho. Implica el paso por una etapa termofílica y una producción natural de fitotóxicas y bajo condiciones controladas origina productos como Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), agua y minerales, así como una MO estabilizada, libre de fitotóxicas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos cuando es aplicado al suelo. <sup>(7)</sup> El proceso se esquematiza en la Figura 1. <sup>(8)</sup>

Al proceso entran los residuos y desperdicios orgánicos que se pueden llamar compostables. Ocurre la descomposición y al final se obtiene el compost o compuesto que contiene MO estabilizada <sup>(9)</sup>.

**Figura 1. Esquema del Proceso de Compostaje**



El compostaje pretende simular las condiciones que podrían ocurrir en un sistema no perturbado, donde la MO se acumula en la superficie del suelo. Este proceso puede ser dividido en cuatro etapas: **mesofílica**, **termofílica**, **enfriamiento y madurez**. <sup>(9)</sup>

Inicialmente en la **fase mesofílica** los microorganismos presentes en el desecho orgánico o en el ambiente, comienzan a descomponer los materiales, se genera un calentamiento donde la temperatura asciende a valores iguales o superiores a 60°C; y los hongos comienzan a desaparecer. A temperaturas superiores, la reacción es llevada a cabo por bacterias formadoras de esporas. Se inicia la **fase termofílica**, donde las sustancias más fácilmente degradables como azúcares,

grasas, almidones y proteínas son rápidamente consumidas, el pH se torna alcalino a medida que el amonio de las proteínas es liberado; la velocidad de la reacción decrece y son atacados los materiales más resistentes. El sistema entra entonces en un proceso de **enfriamiento**, en el cual la temperatura decae, los hongos invaden nuevamente la pila y comienzan a descomponer la celulosa, los microorganismos mesofílicos se proliferan; esto sucede rápidamente en pocas semanas. La etapa final de **madurez**, requiere de algunos meses, las reacciones ocurren en la MO residual dando origen al compost, un producto estable con características similares al humus del suelo. En la etapa de enfriamiento hay una inmensa competencia por el alimento entre los microorganismos y la meso fauna como ácaros, hormigas, moscos, cucarachas... etc.

### **3.2.1. Condiciones Físicas, Químicas y Microbiológicas necesarias para elaborar un Compost**

Ya que el compostaje es un proceso exclusivamente biológico, puede afirmarse que resulta afectado por todos los factores que influyen directa o indirectamente en el metabolismo microbiano. Los aspectos más importantes que deben ser considerados para llevar a cabo un buen compostaje son: <sup>(10)</sup>

#### **3.2.1.1. Sustrato**

Casi todos los residuos orgánicos de origen animal o vegetal son biodegradables por lo que pueden usarse en el compostaje. Entre los residuos más adecuados encontramos:

- Los desechos agrícolas líquidos y sólidos.
- Desechos sólidos urbanos, como basuras.
- Desechos de madera como aserrín, virutas, cortezas...etc.
- Desechos de origen agroindustrial provenientes de industrias azucareras, vinícolas, oliveras, cafeteras...etc.
- Excrementos de diferentes animales.

Generalmente se suelen compostar estos de manera individual, pero para obtener un bioabono rico en nutrientes es preferible elaborar mezclas con materiales que tengan características complementarias, también en algunos casos se adicionan aditivos como fermentos bacterianos, arcillas, fosfatos, cal entre otros.

#### **3.2.1.2. Contenido de Materia Orgánica**

Debe estar alrededor del 50% para que haya suficiente fuente de carbono y energía necesaria para la proliferación de microorganismos, así como suficiente material que al degradarse sirva posteriormente de fuente de nutrientes para las plantas y origine moléculas estables similares a AH y AF, que permitan dar estabilidad al compost, producir una alta Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), una alta retención y solubilización de nutrientes.

#### **3.2.1.3. Tamaño de Partícula**

La disminución del tamaño de las partículas puede aumentar la superficie para el ataque microbiano. Sin embargo, el exceso de partículas muy pequeñas puede conducir a la compactación y a la formación de gran cantidad de microporos, favoreciendo así el desarrollo de condiciones anaeróbicas. El compostaje de residuos semisólidos, como lodos de sistema de tratamiento biológico, exige la mezcla con un material que de cuerpo o volumen, necesario para asegurar la estructura y porosidad adecuadas para la realización del proceso. El tamaño ideal es alrededor de 25 a 27mm.

#### **3.2.1.4. Aireación**

El oxígeno es necesario para la respiración de los microorganismos y para oxidar determinadas moléculas orgánicas de la masa en fermentación. En el sistema el gas carbónico se incrementa mientras el oxígeno disminuye; su consumo está relacionado directamente con la actividad microbiana, por lo que la aireación debe incrementarse, cuando la temperatura aumente.

#### **3.2.1.5. Mezcla / Volteo**

Para prevenir el secado, encostramiento y canalización del aire, el material que está compostándose debe ser mezclado o volteado regularmente o cuando sea

necesario. La frecuencia de la mezcla o volteo depende del tipo de compostaje y del material a compostar. Como el volteo puede depender del contenido de humedad, de las características de los residuos o de la necesidad de aire, es imposible especificar una frecuencia mínima de volteo o número de vueltas en términos generales.

#### **3.2.1.6. Temperatura**

Suele llegar a un rango de 60 - 70°C y rige la presencia de diferentes grupos de microorganismos en distintas etapas del proceso. Si las temperaturas son demasiado altas, se registra una inhibición vital de la mayoría de los microorganismos; frenándose así la descomposición de la MO. Solo unas especies de bacterias termofílicas muestran actividad metabólica por encima de 70°C. Si por el contrario, la temperatura es baja o disminuye demasiado rápido, se requiere practicar un volteo, con lo que se mantiene una temperatura media más elevada como consecuencia de un incremento en la aireación.

#### **3.2.1.7. Humedad**

Este parámetro está íntimamente relacionado con la aireación. Su valor óptimo depende del estado físico y del tamaño de las partículas; así como del sistema de compostaje utilizado. Si la humedad es muy baja, se produce un secado demasiado rápido de la pila que detiene la actividad microbiana, conduciendo a un producto físicamente estable, pero inestable biológicamente. Si la humedad es muy elevada, la aireación disminuye por taponamiento de los poros, llevándose a cabo la descomposición anaeróbica. El contenido de humedad ideal está en el rango de 50-70%.

#### **3.2.1.8. Relación Carbono/ Nitrógeno**

La energía y el balance de los nutrientes están dados por esta relación. El valor ideal está entre 25 y 30. Si la relación es muy pequeña, no hay suficiente carbono para los microorganismos que hacen uso del nitrógeno incrementándose las pérdidas por volatilización del amoníaco. De manera inversa; si la relación es muy alta, se presentará una deficiencia de nitrógeno(N) para los microorganismos.

### **3.2.1.9. pH**

El compostaje se puede desarrollar en un amplio rango de pH, considerándose óptimo los valores entre 6 y 8. Las bacterias prefieren medios neutros mientras que los hongos se desarrollan mejor en medios ácidos. El pH en un compostaje, una vez iniciado es difícilmente alterable; aunque es posible ajustar valores iniciales colocando sustratos o agregando aditivos. Generalmente el pH suele descender al inicio del compostaje, debido a la producción de ácidos orgánicos de cadena corta, provenientes de cadenas carbonadas más complejas que desaparecen posteriormente. <sup>(11)</sup>

### **3.2.1.10. Control de Patógenos**

Si se lleva a cabo correctamente, se puede destruir todos los patógenos, hierbas malas y semillas durante el compostaje. Para conseguir esto, la temperatura debe mantenerse entre 60 y 70 ° C durante 24 horas. <sup>(11)</sup>

## **3.3. SISTEMAS DE COMPOSTAJE**

Desde el punto de vista técnico, el proceso de compostaje puede realizarse en dos tipos de sistemas, abiertos y cerrados; dependiendo como se efectúe el control de la aireación.

### **3.3.1. Sistema Abierto**

Consiste en mantener la mezcla homogénea en un medio al aire libre y con las siguientes alternativas de manejo:

#### **3.3.1.1. Apilamiento Estático**

Se puede realizar con aire por succión, con aire soplado controlando la temperatura, con ventilación alternante (succión y soplado) y control de temperatura.

- Apilamiento con volteo: consiste en realizar movimientos traslacionales de la pila con el fin de que haya una buena aireación necesaria para la respiración de los microorganismos y la oxidación de la MO.
- Apilamiento con volteo y aireación forzada: Consiste además de realizar el movimiento traslacional de la pila inyectarle aire a través de canales con ayuda de una bomba con el fin de aumentar la aireación.

### 3.3.2. Sistema Cerrado <sup>(12)</sup>

Ocurre en reactores de dos tipos:

- Reactores de flujo vertical: se distinguen dos tipos de reactores de flujo vertical:
  - 1) Reactores que permiten la agitación de los sólidos durante su caída; “reactores de lecho agitado”. En este tipo de reactores la aireación es forzada y la alimentación puede ser continua o intermitente.
  - 2) Reactores en los que la mezcla a compostar ocupa todo el volumen disponible y, por tanto, no puede sufrir ningún tipo de agitación a lo largo de su paso por el reactor. Se denominan “reactores de lecho empaquetado o reactores tipo silo”. Pueden ser alimentados de forma continua, intermitente o por tandas. La configuración puede ser rectangular o cilíndrica.
- Reactores de flujo horizontales: Dentro de ellos se suelen distinguir tres tipos diferentes: <sup>(12)</sup>
  - 1) Tambores giratorios: Se pueden distinguir al menos tres tipos de tambores según la forma cómo se muevan los sólidos dentro del reactor.

En uno de los casos, el material de entrada y de salida se localiza en los lados extremos del tambor. Dentro del reactor existen condiciones de flujo pistón, excepto alguna pequeña dispersión consecuencia de la agitación. Probablemente sea el más usado dentro de estos sistemas;

se ha empleado mucho para el compostaje de basuras domiciliarias. La alimentación puede ser continua o intermitente y, generalmente, se utiliza un sistema de aireación forzada.

- 2) Contenedores agitados: Se ha desarrollado un cierto número de reactores de flujo horizontal y lecho de sólidos agitado. Al existir aireación forzada y tener lugar una agitación mecánica de sólidos, el sistema posee una considerable flexibilidad de funcionamiento. Los reactores generalmente no están cubiertos en la parte superior y pueden estar alojados en un lugar provisto de techo para mejorar su funcionamiento en cualquier época del año y controlar mejor las molestias que pueden producir. La mayor parte funcionan con una alimentación diaria. Se usa formas circulares y rectangulares; las dos se aplican a una gran variedad de residuos.

En el sistema de reactor circular, se montan barrenas a lo largo de un puente móvil, que gira de forma muy análoga a como lo hacen los clarificadores circulares en una estación depuradora de aguas residuales. Generalmente el puente emplea unas 2 horas en realizar una revolución completa. El material se introduce por la parte exterior y va trasladándose lentamente hacia el centro del reactor, desde donde cae a una cinta transportadora o depósito situado debajo del reactor. En alguna medida, dentro del reactor, es posible la mezcla de material nuevo con material parcialmente compostado.

- 3) Reactores de lecho de sólidos estático: Consta de una vasija que es esencialmente un reactor tubular o túnel de flujo pistón de sección transversal rectangular. El volumen del reactor puede oscilar entre 10 y 500 m<sup>3</sup>. Los tamaños más grandes se construyen generalmente de hormigón armado y los más pequeños se hacen de acero. Hay un sistema que usa un plato o placa de empuje con movimiento hacia adelante y hacia atrás y que está situado en el extremo de alimentación del túnel; al moverse la placa, queda una zona vacía en un extremo del reactor, al mismo tiempo que el compost sale por el otro extremo; la carga diaria de la mezcla de materiales que se va a compostar se coloca en la zona vacía creada al moverse el pistón. Entre alimentación y alimentación la placa permanece quieta. <sup>(12)</sup>

### **3.4. ABONOS ORGÁNICOS**

Son productos de origen animal o vegetal que aplicados al medio de crecimiento o a las plantas, suministran elementos nutrientes. <sup>(13)</sup>

La utilización de abonos orgánicos ha despertado interés entre los agricultores, principalmente por los efectos negativos que ocasionan los productos químicos a la salud humana y el elevado costo de los insumos en nuestro país. <sup>(14)</sup>

Además, el abono orgánico es beneficioso desde el punto de vista químico, físico y biológico. Es necesario conservarlo, mediante adiciones periódicas de residuos de cosechas, abonos verdes incorporados, compost artificialmente preparados, en condiciones controladas a partir de restos de tejidos vegetales y/o animales y adición de excretas de animales bien compostadas. Estos materiales son ricos en elementos nutritivos tanto para los organismos del suelo, como para las plantas y, además al descomponerse el material orgánico queda un residuo estable humus de buena calidad. <sup>(15)</sup>

Los abonos orgánicos más comunes en la zona del Cauca son: Lombricompost, Gallinaza y Bocashi, entre otros. <sup>(16)</sup>

#### **3.4.1. Lombricompost**

La utilización de lombricompost como una alternativa para mejorar la fertilidad de los suelos cobra mayor importancia, pues su aplicación redundaría en un mejor aprovechamiento de los desechos orgánicos, lo que proporciona una menor dependencia de los insumos minerales. <sup>(16)</sup>

Gracias a la capacidad mineralizadora de las lombrices, se ha encontrado que las deyecciones que estos organismos incorporan al suelo, son muy ricas en nutrientes disponibles para las plantas ya que presentan una mayor capacidad para intercambiar bases, alta concentración de Calcio (Ca), Magnesio (Mg), potasio (K) intercambiable, fósforo (P) y nitrógeno (N) disponible, que las halladas en el sustrato consumido por ellas. <sup>(16)</sup>

### **3.4.2. Gallinaza**

La gallinaza contiene una gran variedad de bacterias, hongos, nemátodos y larvas que ayudan en el proceso de descomposición de la MO. Además se destaca, en comparación con otros abonos orgánicos, por ser una fuente de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe); pero su principal aporte es de nitrógeno así como también aporta MO, mejorando las características de fertilidad del suelo. Este bioabono aplicado en dosis adecuadas tiene propiedades intermedias con respecto a los fertilizantes inorgánicos, asegurándose un apreciable efecto residual. <sup>(16)</sup>

### **3.4.3. Bocashi**

Palabra de origen japonés que significa “*materia orgánica fermentada*”; este abono es activador muy rico en nutrientes y en microorganismos benéficos además favorecen la aireación del suelo. El Bocashi es una buena fuente de nitrógeno e incorpora MO; componentes muy importantes que ayudan a mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. En el proceso de fermentación de este bioabono se va descomponiendo la MO, quedando así un residuo estable denominado humus, el cuál le da las propiedades de calidad al bioabono. <sup>(16)</sup>

Este bioabono al ser aplicado en el suelo cultivable, aumenta la capacidad para que la planta pueda asimilar mejor los nutrientes, fortaleciéndola para un mayor crecimiento y para que se defienda de algunas enfermedades, especialmente las producidas por hongos, además de mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. <sup>(16)</sup>

## **3.5. MATERIA ORGÁNICA**

La MO estable obtenida en el proceso de compostaje está formada por sustancias similares a las húmicas y por sustancias no húmicas como se muestra en la Figura 2. <sup>(17)</sup>

**Figura 2. Composición Química de la Materia Orgánica de un Compost** <sup>(18)</sup>



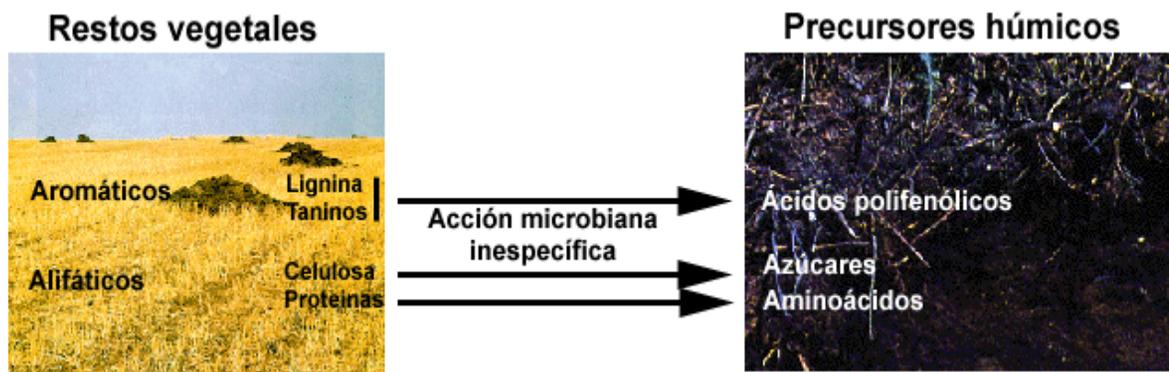
- **Las sustancias no húmicas:** Son moléculas orgánicas que han sido parcialmente descompuestas por reacciones de hidrólisis y que son susceptibles de seguirse transformando hasta mineralización completa o que pueden sufrir procesos de polimerización para transformarse en SH. <sup>(18)</sup>
- **Las sustancias similares a las húmicas:** Son sustancias químicamente modificadas mediante procesos enzimáticos oxidativos a partir de precursores orgánicos, son químicamente estables y están agrupadas en tres clases: AH, AF y huminas. <sup>(18)</sup>

Los restos vegetales están constituidos fundamentalmente por sustancias aromáticas cuyos representantes más genuinos son la lignina y los taninos; y por compuestos alifáticos representados principalmente por celulosa y proteínas.

Sobre ellos actúa la microflora del suelo que realiza su destrucción y posterior polimerización y condensación para generar las SH. Todo este complejo proceso es el que se conoce como humificación.

La celulosa y la lignina son atacadas por hongos y actinomicetos, mientras que las proteínas son transformadas por las bacterias con liberación de nitrógeno inorgánico, que permite el crecimiento fúngico y hace posible la continuidad del proceso de transformación. Las sustancias aromáticas culminan su transformación con la formación de ácidos polifenólicos sencillos, derivados del fenilpropano producido en la rotura de la lignina preferentemente, que son considerados como precursores húmicos. Del mismo modo la celulosa termina dando azúcares sencillos y las proteínas, aminoácidos como se muestra en la figura 3.

**Figura 3. Formación de los Precursores Húmicos <sup>(19)</sup>**

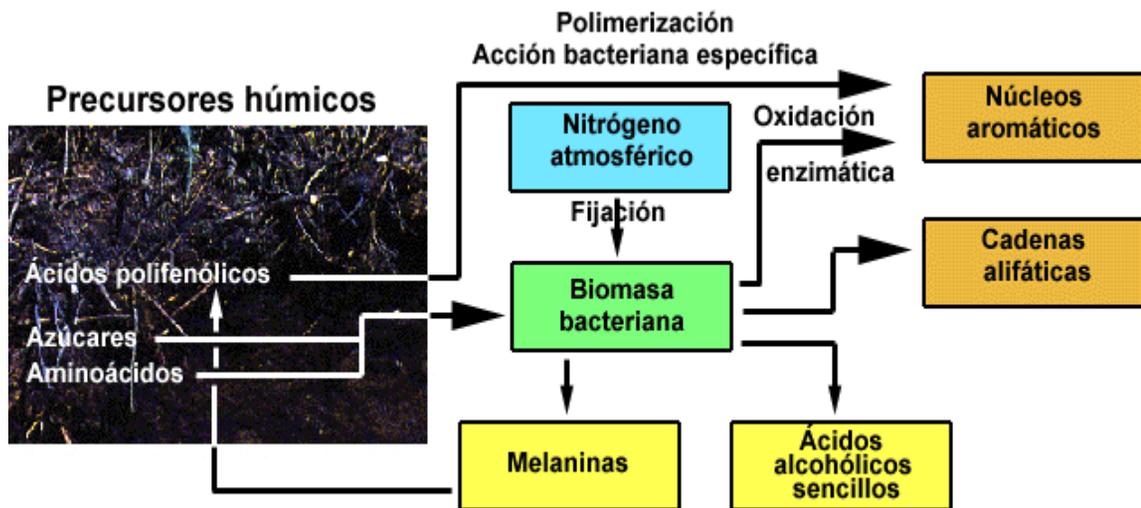


Los aminoácidos son utilizados por las bacterias en la construcción de sus propias proteínas, mientras que los azúcares se consumen como combustible para la obtención de energía por todos los microorganismos edáficos. Este mecanismo hace que el nitrógeno se conserve en su mayor parte, pasando de forma orgánica a inorgánica y viceversa, mientras que el carbono es consumido y transformado en dióxido de carbono pasando a la atmósfera libre. Todo ello conduce a que la relación C/N inicial de los restos vegetales vaya disminuyendo a medida que se avanza hacia la formación de SH. Esta disminución viene favorecida por la posibilidad de algunas bacterias, algas y hongos de fijar nitrógeno atmosférico, que compensa y a veces con creces, las pérdidas de nitrógeno inorgánico que se producen por lavado o por desnitrificación.

Los microorganismos excretan nitrógeno en forma amoniacal y algunos ácidos alcohólicos sencillos procedentes de sus cadenas respiratorias, estos últimos con un fuerte poder complejante. Algo similar sucede cuando mueren. Puede ocurrir que la oxidación del producto bacteriano sea incompleta y los azúcares se caramelizan y forman sustancias parecidas a las melaninas, de naturaleza cíclica, que engrosan el grupo aromático de los precursores húmicos. También se producen condensaciones entre los aminoácidos y los ácidos alcohólicos para

generar cadenas alifáticas que constituirán los terminales activos de las SH como se muestra en la figura 4.

**Figura 4. Proceso de formación de las Sustancias Húmicas** <sup>(19)</sup>



Según la recomendación de la Soil Science Society of América, la MO se define en los siguientes términos: “La fracción orgánica del suelo incluye residuos vegetales y animales en diferentes grados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo”. La parte mas estable de la MO se llama humus, que se puede definir como “la fracción mas o menos estable de la MO que se obtiene después que se ha descompuesto la mayor parte de las sustancias vegetales o animales”. <sup>(20)</sup>

Las SH están compuestas por los AH, AF y huminas, sustancias amorfas de colores oscuros, polímeros tridimensionales de elevado peso molecular, de carácter ácido, constituido por unos grupos funcionales: núcleo (grupos aromáticos nitrogenados, como el indólico y el pirrólico, y grupos bencénicos aromáticos como el naftaleno y el benceno), grupos reactivos (responsables de importantes propiedades de la MO: hidroxilo, amino, metoxi....) y cadenas alifáticas. <sup>(21)</sup>

La fertilidad de un suelo orgánico se ha relacionado con el contenido de humus, y esto se debe a las acciones que este material ejerce sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

### 3.5.1. Efectos Químicos

La no presencia de MO en el suelo conduce a un deterioro de sus propiedades físico-químicas, mayor erosionabilidad, con la consiguiente pérdida de productividad a medio y largo plazo. Por lo tanto, la aplicación de MO en el suelo está sobradamente justificada. Entre los efectos indirectos de las SH sobre la planta hay que incluir los efectos que provoca ésta en el suelo:

- Aporte de nutrientes minerales a las raíces.
- Las SH participan en muchas reacciones, la mayoría de las cuáles son consecuencia de sus propiedades coloidales. Tienen grandes áreas superficiales y capacidades de absorción mayores que los de los minerales de la arcilla.
- Los materiales húmicos participan en el atrapamiento y transporte de iones metálicos, por esta razón mejoran la CIC del suelo, propiedad que consiste en absorber los nutrientes catiónicos del suelo ( $H^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ), poniéndolos más tarde a disposición de las plantas.
- Aumento de la capacidad tampón del suelo a nivel de pH.
- Formación de complejos estables con cationes polivalentes como ( $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  entre otros) y aumento así de la disponibilidad de micronutrientes para las plantas.
- Aporte de SH que actúan como transportadores de nutrientes.
- Afectar a la bioactividad, persistencia y biodegradabilidad de plaguicidas por combinarse con ellos.

Pero se debe tener en cuenta que para conseguir estas propiedades se debe aportar grandes cantidades de MO y de buena calidad. De otro lado las SH ejercen efectos fisiológicos sobre las plantas. La evidencia de efectos positivos puede resumirse en estimulación general en producción de biomasa. Esto implica que la planta absorbe dichas sustancias. Los AH se desplazan a la parte aérea en menor cantidad que los fúlvicos siendo estos últimos los que la planta absorbe mejor.

Las SH ejercen un efecto favorable sobre la toma y contenido de nutrientes. Para algunos elementos como el Cloro (Cl), la adición de SH tiene efectos inhibidores por lo que puede contrarrestar los síntomas de salinidad. Pueden influir directamente en la toma de micronutrientes debido a su capacidad de formar complejos con determinados cationes del Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), etc. Aumentan la solubilidad del hierro en la disolución del suelo y mejoran su translocación en el interior de la planta. Ya sea mediante aplicación al suelo o foliar, aumentan el crecimiento radicular y la formación de raíces secundarias, así como en el número de hojas y flores.

Se han sugerido efectos sobre la permeabilidad de la membrana para explicar el papel de los compuestos húmicos en una mejor nutrición de las plantas, con base en su comportamiento parecido a un surfactante, que estimula la absorción de iones en los tejidos de la raíz.

### **3.5.2. Efectos Físicos**

Las SH contribuyen a la estructura del suelo, haciendo más ligeros a los suelos arcillosos y más compactos a los arenosos, por cuanto estas sustancias aparecen usualmente en el humus como una sustancia semejante a un gel. Este gel se combina y recubre las partículas inorgánicas del suelo, para formar agregados muy estables y resistentes a la desintegración. Comúnmente el humus brinda "cuerpo" a los suelos livianos y ayuda a prevenir la compactación en los suelos arcillosos pesados. Mejoran la permeabilidad del suelo, ya que influyen en el drenaje y aireación de éste, disminuyendo la erosión, provocada tanto por el agua como el viento, así como un aumento de retención de agua en el suelo, por lo que se absorbe más el agua cuando llueve o se riega, y se retiene durante mucho tiempo en el suelo durante el verano.

Los AH, a través del humus, mejoran la capacidad de retención de agua de los suelos, como resultado de la floculación y agregación de partículas, aumentando los espacios capilares. También como resultado de esta agregación, se incrementa la aireación del suelo. La erosión se reduce debido al mejoramiento de la estructura.

Por otra parte, el color oscuro presente en las SH ejerce un determinado efecto sobre el suelo, por cuanto esta tonalidad hace que se presente más absorción de rayos infrarrojos presentes en las radiaciones solares, con lo que el suelo adquiere más temperatura y se pueden absorber con mayor facilidad los nutrientes.

Finalmente podría decirse que las SH favorecen la aireación y oxigenación del suelo, por lo que hay mayor actividad radicular y mayor actividad de los microorganismos aerobios, además de ser una fuente de energía para los microorganismos, por lo que se multiplican rápidamente. <sup>(22)</sup>

### **3.5.3. Efectos Biológicos**

La actividad microbiana del suelo se ve estimulada y favorecida por los aportes de las SH, que le sirve de nutrientes y se multiplican más activamente cuanto mejor provisto esté el suelo de humus, puesto que es una importante fuente de carbohidratos para los microorganismos del suelo. También favorecen el desarrollo normal de cadenas tróficas en el suelo. Además las SH estimulan la permeabilidad de la membrana celular, la formación de raíces y la germinación de semillas. <sup>(23)</sup>

## **3.6. EXTRACCIÓN DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS**

La MO está conformada por SH y sustancias no húmicas. Dichas sustancias están constituidas por grupos químicos que no tienen una composición determinada, estableciendo su comportamiento frente a determinados reactivos. Las SH en su mayor parte se encuentran unidas en la parte mineral del suelo en diferente forma, quedando tan solo una pequeña fracción en estado libre, para solubilizarla es necesario destruir esta unión. <sup>(24)</sup>

En la actualidad se emplean diferentes soluciones para la extracción de las SH. Las sales neutras de los ácidos minerales especialmente el pirofosfato de sodio y algunas sales neutras de los ácidos orgánicos se utiliza para la extracción basándose en la capacidad de formar precipitados insolubles con diferentes elementos (calcio, hierro, aluminio y cationes polivalentes) presentes en el suelo formando enlaces con las SH, el resultado de este es el estado soluble de las SH. <sup>(24)</sup>

El orden de la utilización de estas soluciones se relaciona con el tipo de enlace que se desea romper; usando en forma secuencial los siguientes extractantes:

1. SOLUCION DE TETRABORATO DE SODIO ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) (Buffer de Sorensen): Esta solución diferencia enlaces electrostáticos, que son de difícil rompimiento por simple intercambio iónico de las sustancias órgano-minerales móviles.
2. SOLUCION DE PIROFOSFATO DE SODIO ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ): Rompe enlaces de coordinación especialmente, uniones entre la MO y las arcillas por hidróxidos y óxidos metálicos, que se denominan complejos inmóviles.
3. SOLUCION DE HIDROXIDO DE SODIO ( $\text{NaOH}$ ): Destruye casi todos los enlaces órgano-minerales. <sup>(25)</sup>

### 3.6.1. Ácidos Húmicos

Los AH se definen como el producto de un proceso oxidativo continuado de MO del suelo en presencia de minerales como el calcio, potasio, fósforo y micronutrientes <sup>(26)</sup>. El material resultante está enriquecido por estos elementos más el nitrógeno fijado del aire.

La mayoría de los autores señalan que el contenido de aminoácidos de los AH de distintos suelos, es en general homogéneo, aunque la capacidad de hidrolizar el nitrógeno en los diferentes AH es distinta. La situación del nitrógeno en las moléculas de las SH es muy importante, ya que determina en cierta medida la accesibilidad de éste a los microorganismos.

Los AH corresponden a la última fase de la transformación de la MO. Todas las demás sustancias que se van generando en el proceso de transformación se podrían llamar "MO sólida o líquida" pero no son AH. Químicamente los AH son muy complejos, formados por polímeros, compuestos aromáticos, estructuras alifáticas entre otras. Su peso molecular es muy elevado, tienen una acción más lenta y duradera, presentan una estructura estable y muestran alta CIC. <sup>(27)</sup>

Los AH constituyen la parte más cualificada de la MO, aplicados al suelo mejoran las características físicas, químicas y biológicas de éste, a la vez que equilibran la solución nutritiva. Actúan sobre los compuestos minerales desbloqueando los elementos que los componen; fijan los nutrientes aportados con los abonos disminuyendo las pérdidas por lixiviación. Favorecen el desarrollo del sistema radicular. Aumentan la permeabilidad celular, con lo que facilitan la absorción de nutrientes. Normalmente se aplican en fertirrigación, e incluso por vía foliar en

mezcla con productos fitosanitarios. Son también aptos mezclados con los quelatos correspondientes para su uso en el control de carencias.

A pesar de la diversidad de los AH de distintos suelos, turbas, restos vegetales en descomposición, conservan unos principios de estructura muy semejantes. Estos presentan una naturaleza muy particular, muy distinta a la de cualquier sustancia vegetal. Sobre la naturaleza aromática de los AH de suelos y turbas hablan los datos obtenidos con ayuda de espectroscopía infrarroja.

Los grupos funcionales característicos de los AH son los carboxilos e hidroxilos fenólicos, cuyo hidrógeno es susceptible a las reacciones de sustitución. Por la presencia de estos grupos se determinan las propiedades ácidas y la capacidad de cambio de los AH. Para determinar la cantidad de estos grupos funcionales, habrá que considerar la naturaleza de dichos ácidos, así como los métodos empleados en su determinación.

Actualmente se sabe que los AH son compuestos poliméricos, y que por tanto están constituidos por monómeros, que a su vez están formados por otras unidades estructurales. Entre las unidades citadas, destacan los compuestos aromáticos de tipo fenólicos y nitrogenados, tanto cíclicos (indol, pirimidina, purinas y otros), como aminoácidos alifáticos.

En cuanto a la polémica referente a la estructura amorfa o cristalina de los AH, actualmente ya no existen dudas, ya que se ha demostrado convincentemente la estructura amorfa de dichos ácidos. <sup>(28)</sup>

### **3.6.2. Ácidos Fúlvicos**

Al igual que los AH los AF, son el producto de la transformación de la MO del suelo y corresponden a la última fase de la transformación de la MO. Constituyen una serie de compuestos sólidos o semisólidos, amorfos de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no precipitables por los ácidos, susceptibles en cambio de experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentración de soluciones de cationes no alcalinos. <sup>(29)</sup>

Los AF están constituidos sobre todo por polisacáridos, aminoácidos, compuestos fenólicos, etc. Presentan un alto contenido en grupos carboxílicos y su peso molecular es relativamente bajo, presentan una menor CIC, acción más rápida y

menos duradera, menor estabilidad estructural y por tanto mayor biodegradabilidad en contraste con los AH. <sup>(30)</sup>

Con su estructura simple y su pequeño tamaño (2 Å) entran fácilmente en los intersticios de la red cristalina de las arcillas, movilizándolo hierro y aluminio los cuáles se vuelven solubles. Movilizan igualmente el calcio y el magnesio con los cuáles se ligan. Los fúlvatos formados, son muy móviles y completamente hidrosolubles, por lo que percolan con facilidad en el suelo, lo lixivian donde aparecen. Por otro lado se acumula humus ácido en todos los suelos que carecen de una microvida adecuada y donde por la misma razón, no se favorece la formación del humus. <sup>(31)</sup>

### **3.6.3. Huminas**

Las húminas son ácidos orgánicos que se han fijado en las arcillas por intermedio de puentes catiónicos, o precipitados después de una degradación microbiológica o química. La fracción de humina puede alcanzar en algunos suelos el 80% del carbono total. <sup>(32)</sup>

Las huminas presentan la característica principal de ser la parte del humus insoluble en álcalis y ácidos minerales. Al ser insoluble es relativamente inerte y está constituida por AH y por sustancias húmicas altamente condensadas tan íntimamente unida a la parte mineral del suelo que no puede separarse. <sup>(33)</sup>

Los AH extraídos de huminas tienen un porcentaje de carbono algo menor, y mayor el de oxígeno e Hidrógeno (H), en comparación con los AH extraídos del suelo descalcificado; poseen también menor capacidad de absorción. Probablemente los AH extraídos de huminas son por su naturaleza menos complejos. <sup>(34)</sup>

## **3.7. EVALUACION DEL INDICE DE HUMIFICACION**

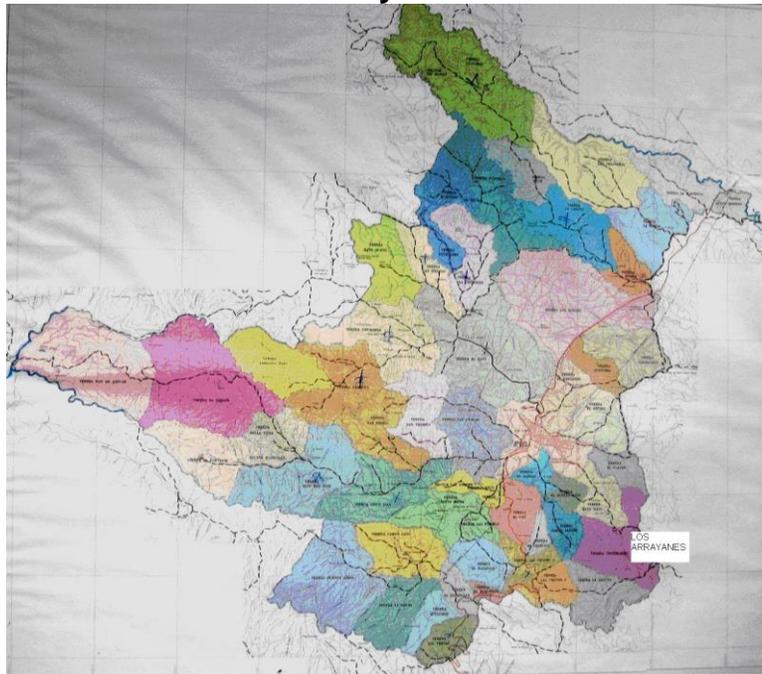
Índices basados en el fraccionamiento de la MO. Los Índices de humificación son:  $H_{R1} = \% \text{ CAH} / \% \text{ CFF}$ ;  $H_{R2} = \% \text{ CAH} / \% \text{ CAF}$  (AH, FF, AF son cantidades de carbono de los AH, FF y en los AF respectivamente). En los procesos de compostaje estos índices aumentan, reflejando la formación de especies estructuralmente más complejas.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El proceso de compostaje evaluado se lleva a cabo en el Relleno Sanitario y La Planta de tratamiento **Los Arrayanes** ubicada a siete kilómetros de la cabecera municipal de Timbío, vía a Paispamba, vereda Cristalares. Pertenece al distrito número siete y clasificada en zona agroecológica. Tiene una extensión total de 27.600 m<sup>2</sup>, de los cuales 12.800 m<sup>2</sup> son utilizados para el relleno sanitario. Situado a 1800 m.s.n.m. Perteneciente al Piedemonte del Franco Occidental de la Cordillera Central. Figura 5.

**Figura 5. Mapa del municipio de Timbío: ubicación de La Planta Los Arrayanes**



Los análisis de laboratorio se realizan en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca. Los análisis de Espectrofotometría de Absorción Atómica se realizan en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

## 4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

En La planta de tratamiento de residuos sólidos del municipio de Timbío “Los Arrayanes” (figura 6), se pueden determinar los siguientes pasos dentro del proceso de compostaje y producción de bioabonos:

**Figura 6. Fotografía de La Planta de tratamiento de residuos sólidos del municipio de Timbío Los Arrayanes**



### 4.2.1. Recolección de la Materia Prima

La recolección de las basuras se lleva a cabo en la galería municipal del municipio de Timbío, tres veces por semana. Figuras 7 y 8.

**Figura 7. Fotografías de la fuente de Materia Prima utilizada para la elaboración de la pila de Compostaje**



**Figura 8. Fotografía de recolección de basuras**



#### **4.2.2. Recepción de Materia Prima**

Las basuras se reciben en La Planta de tratamiento, también tres días por semana (actualmente los días miércoles, sábado y domingo). Se reciben en promedio nueve toneladas de residuos sólidos semanalmente. Siendo estos residuos la materia prima utilizada para iniciar el proceso de compostaje (figura 9).

**Figura 9. Fotografía de recepción de basuras en La Planta Los Arrayanes**



#### **4.2.3. Clasificación**

Aún cuando los programas de educación ambiental y reciclaje que se han implementado en el municipio de Timbío han logrado buenos resultados, aún se presenta combinación de residuos orgánicos e inorgánicos, por lo que es necesaria la separación de materiales no orgánicos de los que continuarán en el

proceso de compostaje. Los materiales reciclables (plástico, cartón, vidrio, chatarra, etc.) se almacenan en la bodega situada en la Planta adecuada para tal fin y con destino a la venta (Figura 10).

Los residuos orgánicos se clasifican con el fin de determinar la composición porcentual de la mezcla de materiales para la elaboración del compost y saber la cantidad de nutrientes que aporta cada residuo de acuerdo a su porcentaje en la mezcla. Esta clasificación se realiza para correlacionar los resultados del análisis de nutrientes con respecto a la mezcla.

**Figura 10. Fotografía de clasificación de basuras en La Planta Los Arrayanes**



#### **4.2.4. Trituración**

Mediante este proceso los residuos orgánicos son transformados en una pasta orgánica parcialmente homogenizada que a su vez es transportada a la zona de compostaje (figura 11).

**Figura 11. Fotografía de trituración de basuras en La Planta Los Arrayanes**



#### **4.2.5. Apilado**

Para la elaboración del compost se realizan tres capas, la primera capa está compuesta por cal agrícola, enseguida de esta se adiciona la pasta parcialmente homogenizada, se formaron **pilas** de aproximadamente 2m de ancho, 3m de longitud y 3m de altura. Finalmente se agrega cal agrícola más miel de purga en la parte superior de la pila. La pila presenta una forma triangular y es rodeada por tablas separadas a una distancia de 80cm con el fin de facilitar la aireación del sistema y evitar el esparcimiento del material (figura 12).

**Figura 12. Fotografía de Apilado**



#### **4.2.6. Volteo**

Este paso es muy necesario dentro del proceso puesto que permite la aireación del sistema favoreciendo condiciones aerobias propias del proceso. En la Planta

de tratamiento de residuos sólidos del municipio de Timbío Los Arrayanes. La pila es volteada un total de 8 veces durante el proceso de compostaje, cuya duración es aproximadamente de 2 meses, sin embargo esto puede variar de acuerdo a la época climática. El volteo se realiza en forma translacional, mas no rotacional, es decir, es necesario cambiar la pila de lugar al realizar el volteo (figura 13).

**Figura 13. Fotografía de volteo de la pila de Compostaje**



#### **4.2.7. Tamizaje**

Se realiza con el fin de separar algunas partículas resultantes del proceso que son demasiado grandes o aún no han cumplido la compostación total para reincorporarlas a nuevos procesos (figura 14).

**Figura 14. Fotografía del Tamizaje**



#### 4.2.8. Maduración

Es el proceso final del compostaje en donde se estabiliza la descomposición de los residuos orgánicos en un periodo de dos meses (figura 15).

**Figura 15. Fotografía del Compost**



#### 4.2.9. Empacado

El compost obtenido al final del proceso es empacado en bultos de polietileno por 50kg (figura 16).

**Figura 16. Fotografía del Empacado**



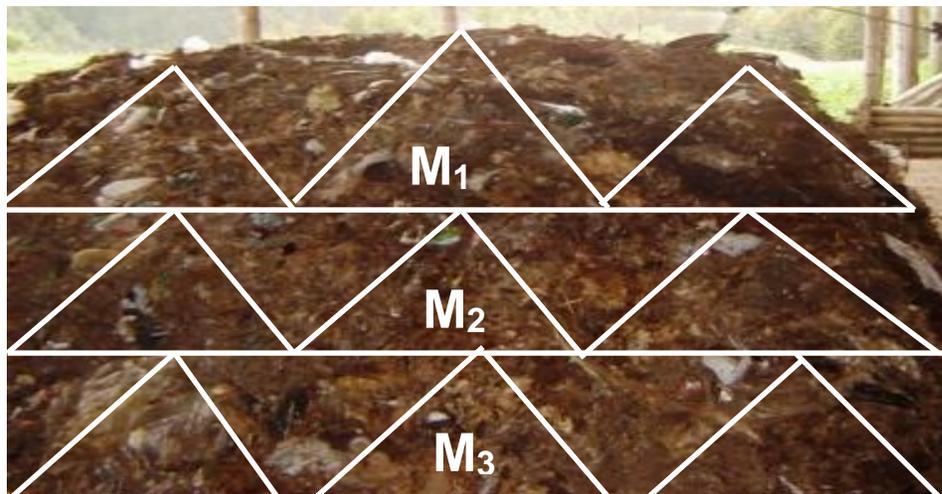
### 4.3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Con el objeto de realizar el seguimiento del proceso de compostaje, se toman las muestras desde el inicio del proceso y en períodos quincenales con el fin de obtener los datos necesarios para trazar las curvas de los análisis físicos y químicos durante el tiempo del proceso de compostaje.

#### 4.3.1. Toma de Muestras

Para tomar las muestras del material a compostar y del abono obtenido, se hacen sondeos en la pila formada, para ello se fracciona la **pila** en tres regiones: superior, media e inferior. Cada fracción se recorre en zig – zag, tomando 15 submuestras y mezclándolas homogéneamente para formar con éstas una muestra compuesta de 1kg (figura 17). Se obtiene así un total de tres muestras compuestas que conformaron las tres réplicas. Las muestras compuestas se llevan al laboratorio y se determina inmediatamente la humedad de campo y posteriormente se secan al aire durante 24 horas, se muelen y se pasan por tamiz de 2mm.

**Figura 17. Forma de realizar el muestreo en la pila de Compostaje**



### **4.3.2. Evaluación de parámetros Físicos y Químicos del proceso de Compostaje**

La evaluación comprende el análisis de parámetros físicos y químicos mediante metodología establecida por ICONTEC EN NORMA DE-204/02. <sup>(35)</sup> y por metodología estandarizada en el Laboratorio de Agroquímica de acuerdo a la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas.

#### **4.3.2.1. Análisis Físicos**

- **Temperatura**

En la etapa inicial del proceso se evalúa la temperatura tres veces al día en diferentes posiciones de la pila, con el propósito de constatar que se cumplan las cuatro etapas necesarias para el proceso de compostaje: mesofílica, termofílica, de enfriamiento y maduración. Dicha temperatura se la mide con un termómetro de máxima.

- **Humedad de Campo**

Se determina por el método gravimétrico, pesando la muestra antes y después del calentamiento a 105°C por 24 horas, con el objeto de eliminar el agua superficial en una estufa con circulación de aire forzado. <sup>(36)</sup>

- **Humedad**

Igualmente se determina por el método gravimétrico una vez seca la muestra al aire. Este valor se utiliza para expresar los resultados en base seca. <sup>(36)</sup>

#### **4.3.2.2. Análisis Químicos**

En la determinación de cada parámetro se toma una determinada cantidad de muestra, utilizando para ello el método del cuarteo que consiste en dividir la muestra en cuatro partes, se toman dos de ella aleatoriamente en sentido opuesto, a estas se les hace el mismo tratamiento hasta obtener la cantidad de muestra requerida para cada procedimiento.

- **pH**

El pH se determina por medio de un potenciómetro, en una suspensión de 10g de muestra con 20mL de agua destilada. Se agita durante una hora intermitentemente y luego se mide el pH. <sup>(36)</sup>

- **Determinación de la Materia Orgánica**

Para evaluar el contenido de MO en la muestra se determina mediante el método Walkey – Black. El cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en la muestra con un oxidante en medio ácido; el oxidante empleado es Dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado. Por medio de este método se extrae el carbono fácilmente oxidable. Se pesa 0.05g de muestra y se adiciona 10mL de  $K_2Cr_2O_7$  0.1N y 20mL de  $H_2SO_4$  concentrado. Se agita y se deja enfriar. Una vez frío se adiciona 150mL de agua destilada, 10mL de Ácido Fosfórico ( $H_3PO_4$ ), tres gotas de ferroína y se valora el exceso de  $K_2Cr_2O_7$  con solución ferrosa 0.5N llevando un blanco de muestra. <sup>(36)</sup> La reacción se muestra en la ecuación 1.

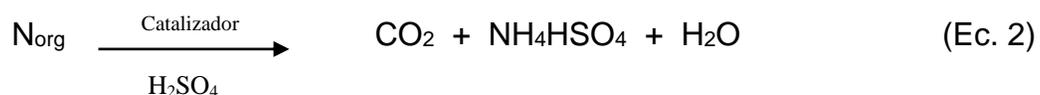


- **Determinación de Nitrógeno por el Método de Kjeldahl**

Este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de nitrógeno procedente de diversos materiales, comprende tres etapas:

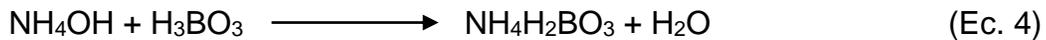
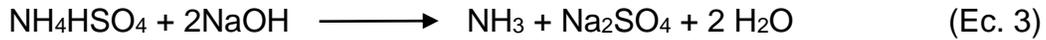
1) Oxidación de la muestra

Las muestras se tratan con  $H_2SO_4$  y catalizadores para oxidar la MO y convertir el nitrógeno en Sulfato Ácido de Amonio ( $NH_4HSO_4$ ) según la reacción descrita en la ecuación 2:



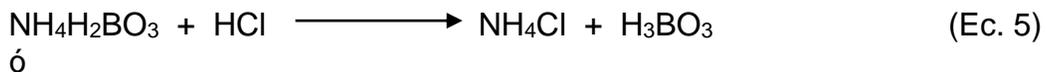
## 2) Descomposición del sulfato ácido de amonio

El  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  se descompone por medio de un exceso de álcali para liberar el Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) el cual se recoge por destilación sobre Ácido Bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_4$ ). Las reacciones son las siguientes: (ecuaciones 3 y 4)



## 3) Titulación del borato de amonio

El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con Ácido Clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  utilizando como indicadores una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno o de rojo de metilo y verde de bromocresol. Las reacciones son las siguientes: <sup>(36)</sup> (ver ecuaciones 5 y 6)



- **Relación C/N**

Se determina mediante la relación entre el contenido de carbono orgánico y el contenido de nitrógeno total.

## 4.4. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y GRADO DE MADUREZ DEL COMPOST

Se evalúa la calidad y madurez del compost obtenido, practicando todos los análisis físicos y químicos establecidos en la norma ICONTEC EN NORMA DE-204/02 y parámetros científicos establecidos por la Sociedad Internacional de SH, implementados en el laboratorio de Agroquímica. <sup>(37)</sup>

#### **4.4.1. Análisis Físicos.**

Los análisis físicos comprenden las siguientes determinaciones:

##### **4.4.1.1. Humedad de Campo**

Se determina de igual forma que en el numeral 4.3.2.1.

##### **4.4.1.2. Humedad**

Se determina de igual forma que en el numeral 4.3.2.1.

##### **4.4.1.3. Densidad**

Se pesa una probeta limpia y seca luego se adicionan 50g de muestra seca (tamizada por malla 30). Se determina el peso de la probeta más la muestra. La densidad del material orgánico se expresa en  $\text{g/cm}^3$  y se calcula según la ecuación 7:

$$D = W / V \quad (\text{Ec.7})$$

Donde

$W$  = Masa del material colocado en la probeta expresado en g.

$V$  = Volumen ocupado por el material en la probeta expresado en  $\text{cm}^3$ .

##### **4.4.1.4. Capacidad de Retención de Agua**

Se toma aproximadamente 100g del material que se utilizó para la determinación de densidad y se le adiciona poco a poco volúmenes de agua medidos utilizando una probeta. Se agita continuamente con la espátula de madera, esto con el fin de eliminar aire, hasta formar poco a poco una masa. Se adiciona agua hasta llegar a un punto de equilibrio donde no absorba más agua y no la escurra. La capacidad de retención de agua se calcula según la ecuación 8:

$$\%SA = V \times (100+Pw)/Pm \quad (\text{Ec.8})$$

Donde

$V$  = Volumen de agua adicionado.

$Pw$  = porcentaje de humedad.

$Pm$  = Peso de la muestra.

#### **4.4.1.5. Conductividad Eléctrica**

Se determina dejando en reposo la pasta saturada por 24 horas, luego se filtra al vacío con papel cualitativo recogiendo el filtrado en un vaso precipitado midiendo así la conductividad.

#### **4.4.1.6. Pérdidas por Volatilización**

Se seca en la estufa un crisol con tapa por 30min a 100°C, se deja enfriar en el desecador y se pesa. Luego se pesa en el crisol 5g del material molido y tamizado, posteriormente se lleva a la mufla aumentando la temperatura gradualmente hasta 400°C y se deja durante 4 horas aproximadamente hasta obtener cenizas blancas o grisáceas.

#### **4.4.2. Análisis Químicos**

Los análisis Químicos comprenden las siguientes determinaciones:

##### **4.4.2.1. Contenido de Carbono Orgánico**

Se determina de igual forma que en el numeral 4.3.2.2.

##### **4.4.2.2. Contenido de Nitrógeno Total**

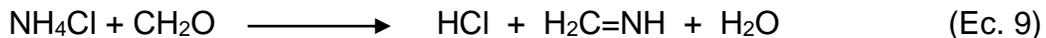
Se determina de igual forma que en el numeral 4.3.2.2.

##### **4.4.2.3. Relación C/N**

Se determina de igual forma que en el numeral 4.3.2.2.

#### 4.4.2.4. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico

Consiste en desplazar todos los cationes que tiene la muestra y reemplazarlos por otro catión, en este caso Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). La muestra seca y tamizada, se satura con acetato de amonio 1N pH 7. El ión  $\text{NH}_4^+$  se desplaza con  $\text{Na}^+$  (NaCl al 10%) por lo que el ión  $\text{NH}_4^+$  queda en forma de Cloruro de Amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ); se agrega formaldehído neutralizado al 40% de tal manera que se genera Ácido Clorhídrico (HCl), de acuerdo a la siguiente reacción:



El HCl generado se valora con NaOH 0.1N en presencia de fenolftaleína.

#### 4.4.2.5 Determinación de Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Microelementos

Se pesa 0.1g de abono, se adiciona inicialmente 3mL de Ácido Perclórico ( $\text{HClO}_4$ ) y 1mL de Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), la digestión se lleva a cabo bajo calentamiento moderado aumentando la temperatura gradualmente hasta alcanzar la temperatura de ebullición del  $\text{HNO}_3$ , posteriormente se aumenta la temperatura continuamente hasta alcanzar la temperatura de ebullición del  $\text{HClO}_4$ . Se lleva a sequedad y finalizando la digestión se deja enfriar a temperatura ambiente, adicionando agua a la cápsula, se filtra recogiendo el filtrado en un balón aforado de 100mL. La solución obtenida se almacena en frascos plásticos previamente lavados con mezcla de ácidos, agua deionizada y secos. Esta solución se emplea para las respectivas determinaciones mediante Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).

### 4.5. EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN

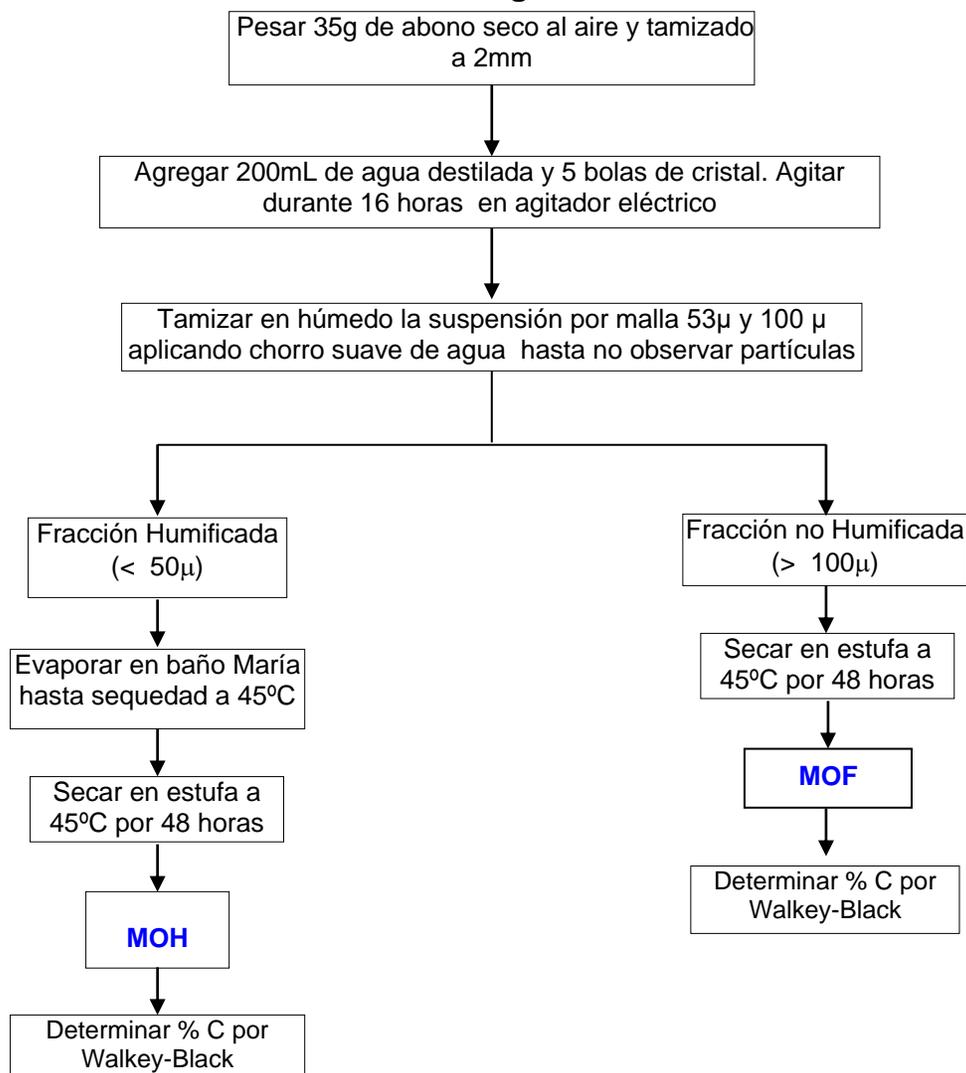
Se evalúa el grado de humificación del compost obtenido, determinando los índices de humificación tales como  $H_{R1} = \% \text{CAH} / \% \text{CFF}$ ,  $H_{R2} = \% \text{CAH} / \% \text{CAF}$  y relación  $E_4/E_6$ , así como caracterización de algunos grupos funcionales propios de estas sustancias por medio de espectroscopia IR. Para ello, es necesario inicialmente hacer la extracción y separación de SH.

#### 4.5.1. Separación de las Fracciones de la Materia Orgánica

Para extraer y separar las SH, es necesario primero hacer un fraccionamiento de la MO en: **Materia Orgánica humificada, (MOH) y Materia Orgánica Fresca o Libre (MOF)**, mediante el método granulométrico.

El método granulométrico implementado por los trabajos anteriormente realizados en el Laboratorio de Agroquímica, consiste en disociar por tratamiento mecánico, a través de un tamizador eléctrico, los agregados normalmente estables del abono en agua. Teniendo en cuenta que este tratamiento produce el mínimo de desnaturalización, el procedimiento se relaciona en la figura 18.

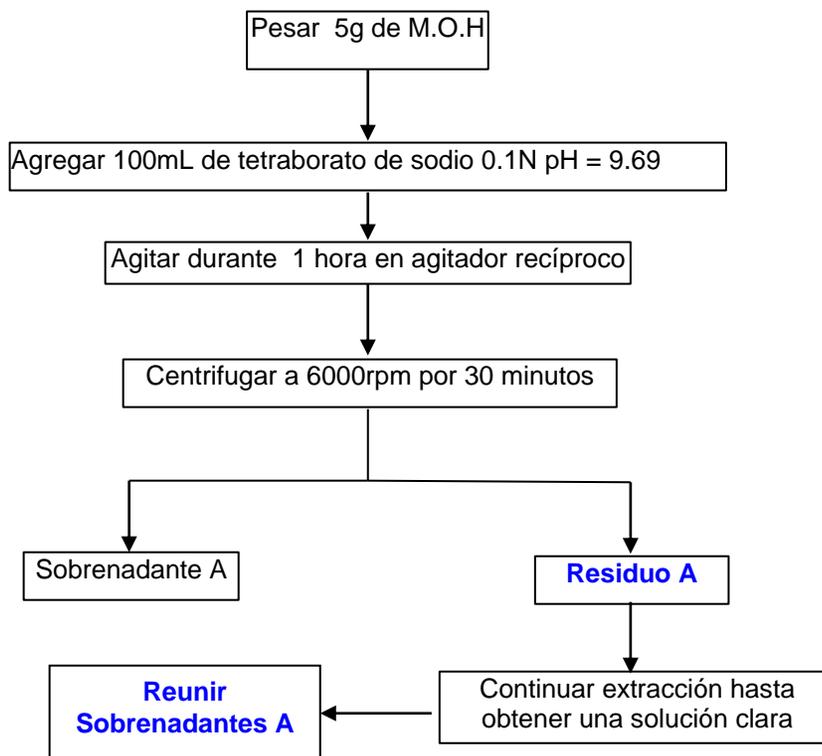
**Figura18. Diagrama del método granulométrico para el fraccionamiento de la Materia Orgánica**

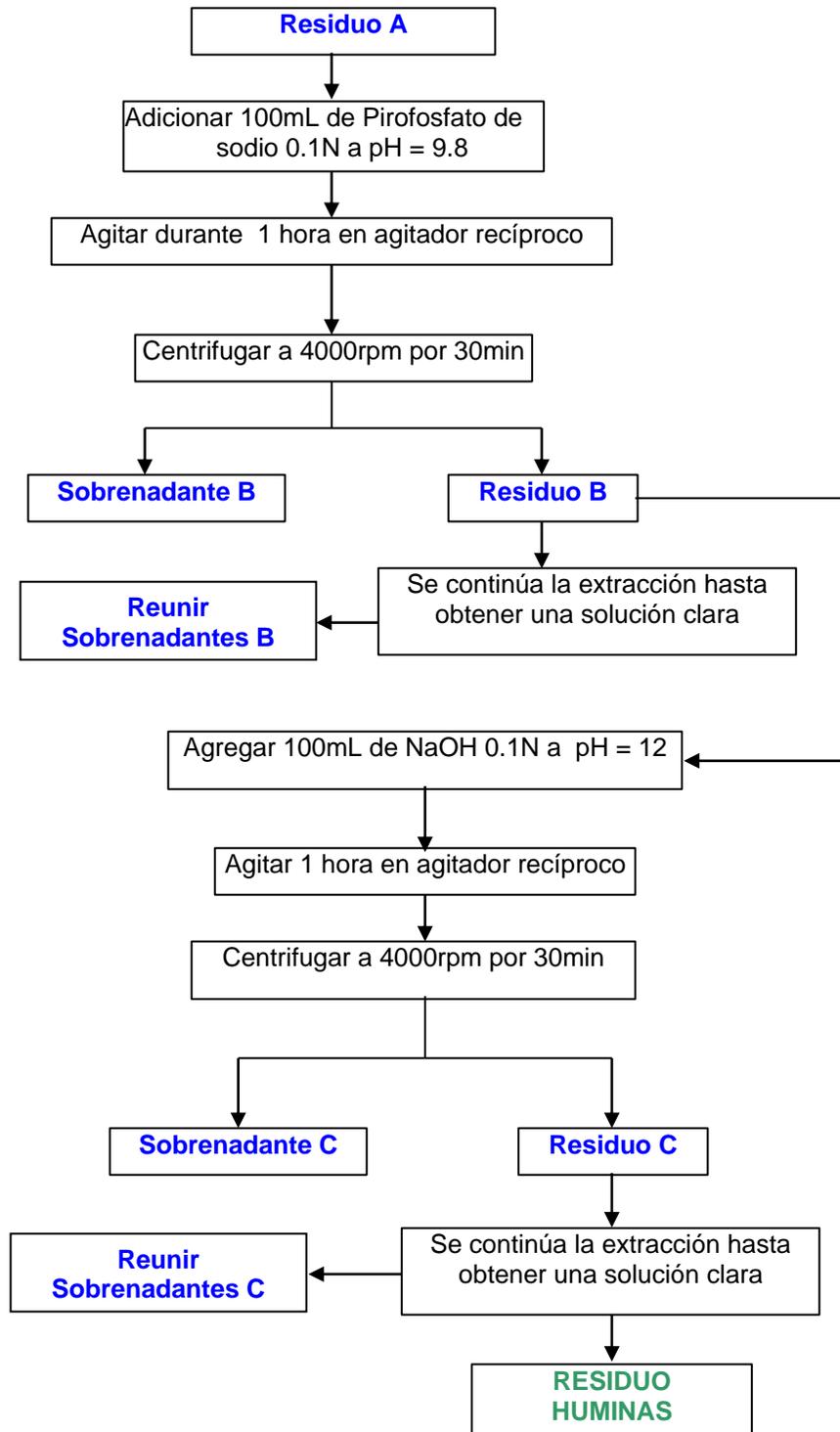


#### 4.5.2. Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost y determinación del Índice de Humificación $HR_1$

En la extracción de las SH se parte de la MOH empleando el método implementado por Dávila et al (2002)<sup>(38)</sup> y Mosquera et al (2006)<sup>(39)</sup>. Se realiza una extracción sucesiva mediante el uso de tres soluciones diferentes de carácter básico con el objeto de separar la FF y los AH, de las huminas, debido a que estas últimas son insolubles a cualquier rango de pH. Las soluciones empleadas son: a) una solución de tetraborato de sodio 0.1N, para romper enlaces electrostáticos por simple intercambio iónico, b) una solución de pirofosfato de sodio 0.1N, para romper enlaces de coordinación, específicamente uniones entre la materia orgánica y las arcillas con lo que se afectan los complejos inmóviles y c) una solución de hidróxido de sodio 0.1N, la cual destruye casi todos los enlaces órgano-minerales. De esta forma se obtienen varios sobrenadantes, donde se encuentran los AH y la FF y una fracción insoluble que se denomina humina. En la figura 19 se recopila la metodología utilizada para dicha extracción.

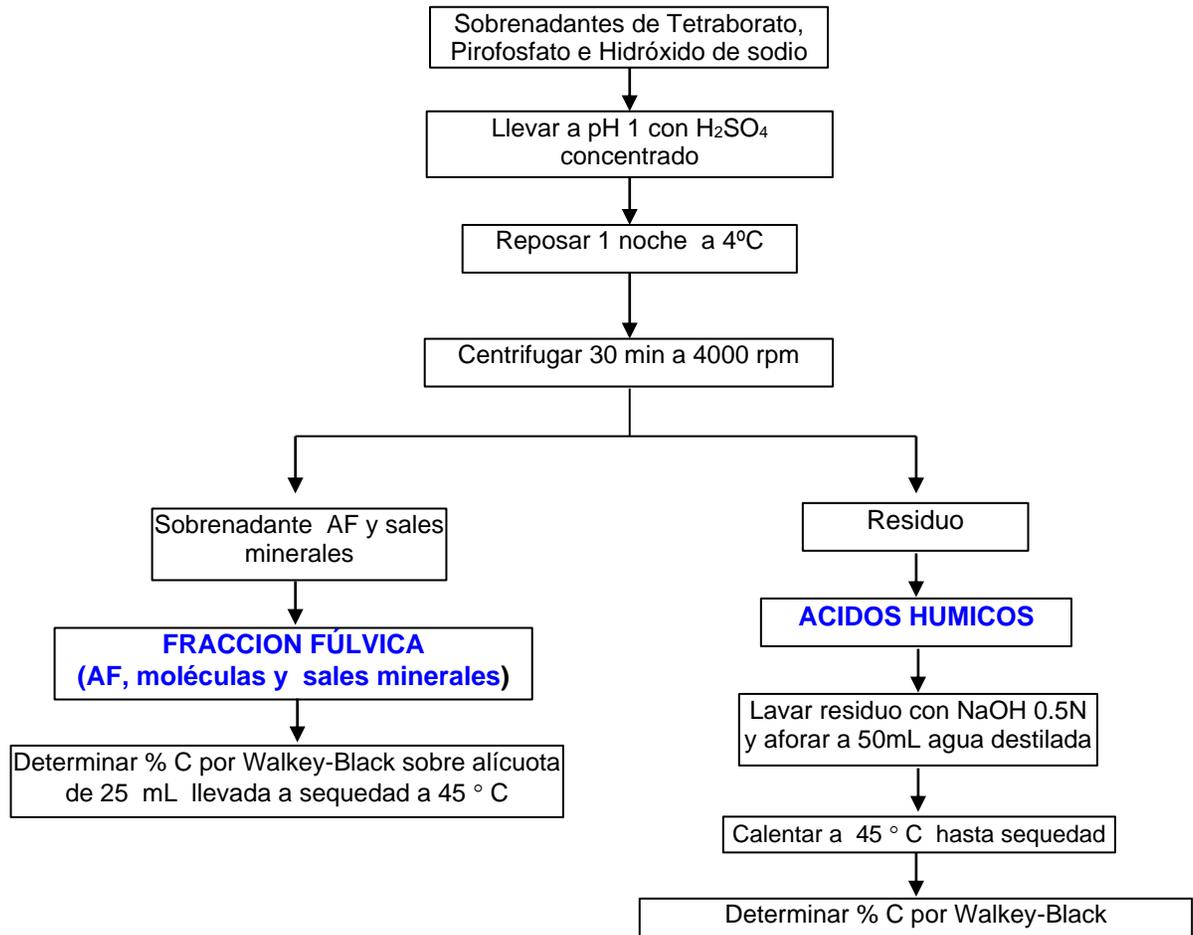
**Figura 19. Diagrama de la extracción de las Sustancias Húmicas**





En el figura 20 se muestra el procedimiento para la separación de la FF y AH.

**Figura 20. Diagrama de la separación de la Fracción Fúlvica y los Ácidos Húmicos**



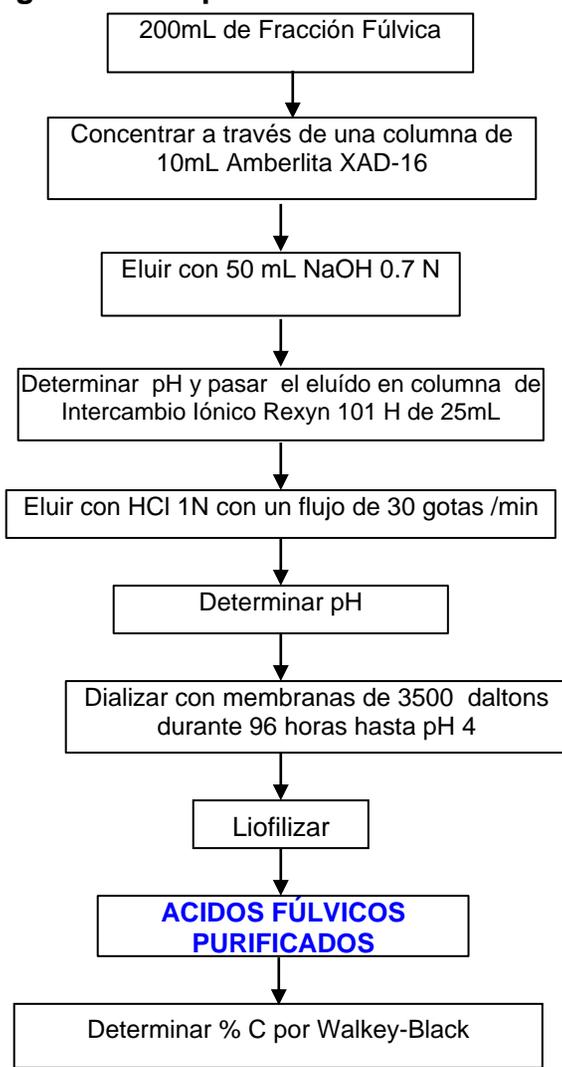
El índice de Humificación **HR<sub>1</sub>** se determina mediante la relación % CAH / % CFF.

### 4.5.3 Purificación de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos y determinación del Índice de Humificación HR<sub>2</sub>

Para determinar el índice de humificación HR<sub>2</sub> es necesario primero purificar los AH y los AF.

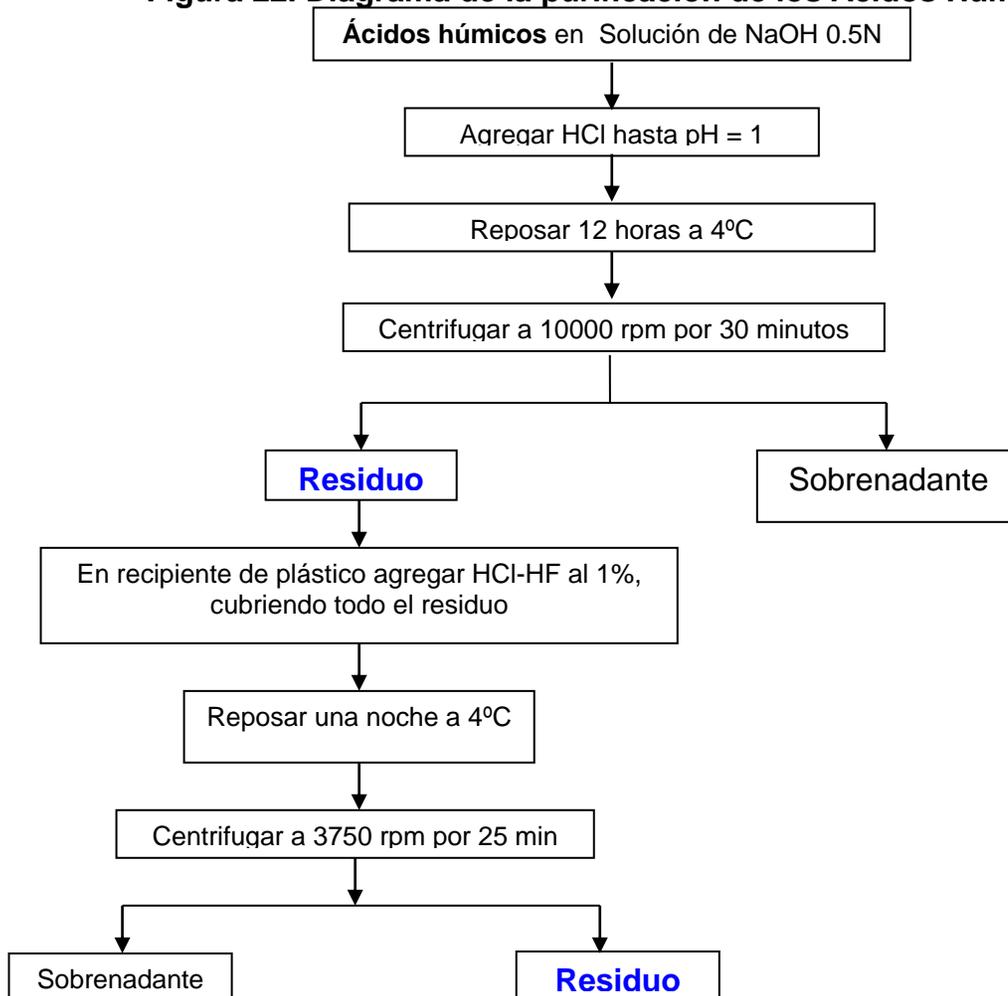
En la figura 21 se describe el proceso seguido para la **purificación de los AF**. A los sobrenadantes que contienen los AF y sales minerales se les denomina **FF (Fracción Fúlvica)**. La purificación de los AF se realiza mediante resinas de adsorción, intercambio y membranas de diálisis.

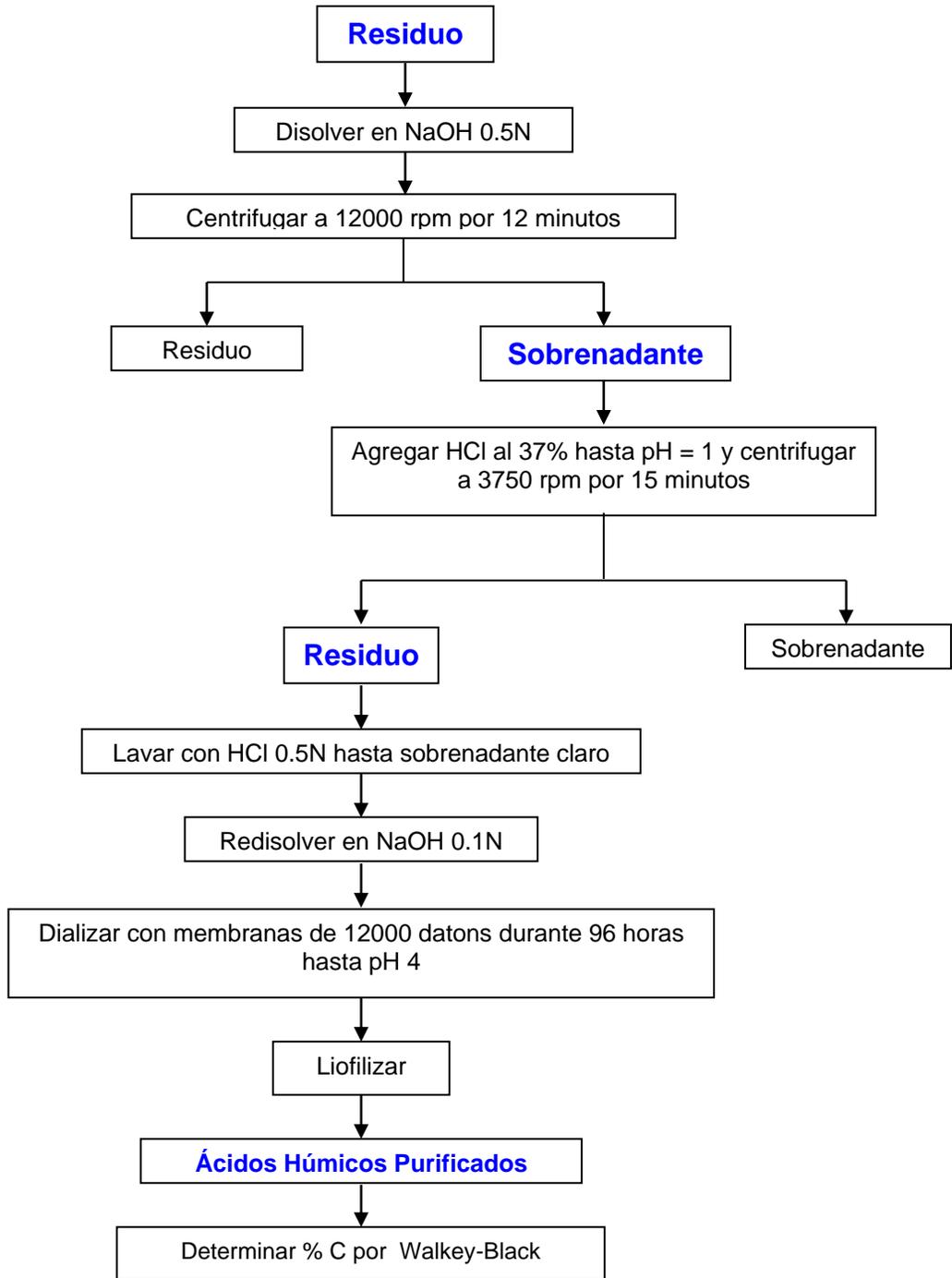
**Figura 21. Diagrama de la purificación de las Ácidos Fúlvicos**



La purificación de los AH se realiza mediante la combinación de metodologías: centrifugación a alta velocidad, tratamiento con ácido clorhídrico-fluorhídrico para romper las uniones con compuestos inorgánicos y diálisis por 96 horas, se utiliza membranas de celulosa de 12000 daltons, hasta obtener un cambio de pH hasta un valor ácido y eliminación de los cloruros en la solución de AH. Posteriormente se liofiliza la muestra con el fin de obtenerla en estado sólido. En la figura 22 se describe el proceso seguido para la purificación de los AH.

Figura 22. Diagrama de la purificación de los Ácidos Húmicos





El índice de Humificación  $HR_2$  se determina mediante la relación % CAH / % CAF, después de su purificación.

#### **4.5.4. Determinación de la relación de densidades ópticas entre 465 y 665nm (Relación $E_4/E_6$ )**

La medida a estas dos longitudes de onda permite conocer la densidad óptica de los AF purificados y AH purificados determinando la relación entre el contenido de carbón aromático y el carbón de cadenas alifáticas. Esta medición se realiza tomando 0.001g de cada fracción, se llevan a un volumen de 10mL con bicarbonato de sodio 0.05N, para medir la absorbancia de esta solución a 465 y 665nm. <sup>(40)</sup>

#### **4.5.5. Espectroscopía infrarroja IR de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos**

La espectroscopia IR se aplica con el fin de identificar bandas características de las SH, correspondientes a grupos funcionales. Para ello se, utiliza un espectrofotómetro con Transformada Rápida de Fourier y una pastilla de la mezcla de 1mg de los correspondientes ácidos con bromuro de potasio al 1%.

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1. COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LA MEZCLA DE MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL COMPOST**

Los materiales utilizados para la preparación del compost presentan la composición porcentual relacionada en la tabla 1.

**Tabla 1. Composición porcentual de la mezcla de materiales utilizados para la elaboración del Compost**

<b>MATERIAL</b>	<b>PESO (Kg)</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
Plátano (troncho, plátano y hojas)	330	9.62
Cebolla	300	8.75
Vainas arveja	270	7.87
Vainas de frijol	250	7.29
Cartón, papel	250	7.29
Paja	200	5.83
Habichuela Roja	150	4.37
Hoja de Yuca	150	4.37
Cáscaras de Naranja	120	3.50
Cáscara de coco	120	3.50
Papa	90	2.62
Cáscara de repollo	85	2.50
Hojas de choclo	80	2.33
Vainas Haba	80	2.33
Zanahoria	80	2.33
Acelga	75	2.19
Naranja(fruta entera)	70	2.04
Papaya	65	1.90
Mango	55	1.60
Tusas de choclo	55	1.60
Espinaca	45	1.31
Limonos	40	1.17
Mandarina	25	0.73
Ullucos	7	0.20
Achiote	5	0.15
Sandia	2.5	0.073
Cáscaras de huevo	1	0.029
Miel de purga(diluida en 2L de agua)	7	0.20
Cal Agrícola	6.25	0.18
Tierra negra(adicionada al final del proceso)	100	2.92
Hueso bovino(ceniza)	150	4.37
Estiércol bovino seco	45	1.31
Agua(Adicionada a mitad del proceso y a los 45 días)	120	3.50
<b>TOTALES</b>	<b>3428.75</b>	<b>100</b>
Peso en Toneladas	3.43	

Fuente: Elaboración propia.

Se observa una amplia y variada mezcla de materiales, lo que garantiza una amplia variedad de macromoléculas y minerales que a su vez conducen a un amplio grupo de microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos contribuyendo en la transformación de dichos residuos. Estas macromoléculas y minerales hacen parte del valor nutricional del bioabono enriqueciéndolo, mejorando así su calidad. El mayor porcentaje del 7% al 10% corresponde a los residuos de plátano, cebolla, vainas de frijol, vainas de arveja y residuos de cartón y papel.

De acuerdo a los datos presentados en la tabla 2 de valor nutricional de cada uno de estos sustratos se puede deducir que el plátano aporta principalmente carbohidratos, el frijol proteínas y almidón, la arveja carbohidratos y proteínas, la cebolla sales minerales y agua al igual que los otros sustratos.

En menor proporción del 2% al 6%, se encuentran cáscaras de repollo, naranja y coco, residuos de acelga, papa, habichuela, zanahoria, naranja, vainas de haba, hojas de choclo y yuca, tierra negra y hueso de bovino (ceniza). Estos materiales presentan una variada composición química entre los cuáles los más destacados son; para las cáscaras de repollo carbohidratos y proteínas, las cáscaras de naranja carbohidratos, proteínas y cenizas, las cáscaras de coco carbohidratos, fósforo y calcio, la acelga aporta principalmente agua, la papa carbohidratos, proteínas y potasio.

Finalmente en una baja proporción del 0.01% al 2%, se encuentran los residuos de limón, papaya, mango, cáscaras de huevo, sandía, mandarina, ullucos, espinacas, achiote, miel de purga, tusas de choclo, cal agrícola y estiércol seco. El aporte de sus respectivos nutrientes al bioabono es igualmente valioso puesto que no se encuentran en bajo porcentaje, además existe una compensación de un nutriente con otro.

**Tabla 2. Composición Química de los materiales utilizados para la elaboración del Compost <sup>(41)</sup>**

MATERIAL	AGUA (%)	PROTEÍNAS (%)	LÍPIDOS (%)	CARBOHIDRATOS (%)	ALMIDÓN (%)	CENIZAS (%)	Na (mg/100g)	K (mg/100g)	Ca (mg/100g)
Plátano	75.7	1.1	0.2	22.2			1	420	8
Cebolla	86	1.4	0.2				7	180	32
Vainas de Arveja	72.60	7.10		18.80		0.90			27
Frijol		26.16	1.03		35.64	3.20		1300	0.11
Paja									
Habichuela	90	2	0, 2	5			10	270	40
Hoja de Yuca						1.70	5.1	350	430
Cáscara de naranja	90.1	1.1	0.03	8.2			6	148	26
Cáscara de coco	4	8	3	82					156
Papa	77	2.5	0.2	18			7	430	9
Cáscara de repollo	90	3.3	0.3	4			18	228	40
Vainas haba	77	9	0.7	12			100	1000	18
Zanahoria	88.6		0.2	10.1				0.1	
Acelga	91.1		0.3						88
Naranja	89.3		3.4	62.70		6.9		0.62	2
Papaya	90.4		0.25	4.68		0.64			200
Mango	81.8	0.5		16.4					10
Espinaca		3.2-3.77	0.3-0.65						81-93
Limones	75.1	0.95	0.01	6.3			4	135	20
Mandarina	87	0.8	0.2	11.6			2	110	40
Ullucos	90	0.9	0.2	5			10	270	28
Achiote	40	2	0.02	3.7			0.5	186	12
Sandía	93	0.40-0.60	0.20	6.4			7	1	100
Cáscaras de huevo		3-4							950
Estiércol de bovino	71.8							1430	2290

**Continuación Tabla 2. Composición química de los materiales utilizados para la elaboración del compost**

MATERIAL	Fe (mg/100g)	Cu (mg/100g)	P (mg/100g)	Mg (mg/100g)	Mn (mg/100g)	Cl (mg/100g)	Zn (mg/100g)	S (mg/100g)	I (mg/100g)	N (mg/100g)
Plátano	0.7	1.56	28	31	0.64	125				
Cebolla	0.50	0.10	44	16	0.25	25	0.08	70	0.02	
Vainas de Arveja	1.70		134							
Frijol			0.45							
Paja			1500							1040
Habichuela	1		40							
Hoja de Yuca	24.6	0.3	80	7.2	120		7.1			
Cáscaras de Naranja	0.6	0.26	16	9	0.04	4		8		
Cáscara de coco			200							
Papa	0.6		52							
Cáscara de repollo	1		4							
Vainas haba	2		217							
Zanahoria										
Acelga	3.2									
Naranja			0.6	0.16				0.06		
Papaya	0.4									
Mango	0.4		14							
Espinaca	3.0-3.1		51-55							
Limonos	0.4	0.26	16	7	0.02	2		6		
Mandarina	0.4	0.1	18	11	0.04	2		10		
Ullucos	10		40							
Achiote	0.5		26							
Sandia	0.5		10							
Cáscaras de huevo										
Estiércol de bovino		10.6	400	400	19		0.086			1570

## 5.2. ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Con el propósito de evaluar el proceso de compostaje se toman tres muestras a partir de la pila de compostaje en diferentes puntos; inferior, medio y superior (figura 17) cada 15 días por un periodo de 2 meses. Los parámetros evaluados son:

### 5.2.1 Temperatura

Los datos para los diferentes valores de temperatura se presentan en las Tablas 3,4 y 5 y en las figuras 23, 24 y 25 respectivamente.

**Tabla 3. Variación de la temperatura en función del tiempo.  
Hora: 8:00 A.M.**

MES			TEMPERATURA (°C)		
	FECHA	TIEMPO (Días)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
JULIO	18	1	27	29	28
	19	2	51	49	48
	20	3	55	55	56
	21	4	60	57	60
	22	5	<b>67**</b>	<b>66**</b>	<b>65**</b>
	23	6	59	52	49
	24	7	59	57	60
	<b>25*</b>	<b>8</b>	47	46	49
	26	9	48	49	50
	27	10	<b>64**</b>	<b>63**</b>	<b>65**</b>
	28	11	61	63	65
	29	12	54	50	59
	30	13	50	52	49
	31	14	53	49	50
AGOSTO	<b>01*</b>	<b>15</b>	47	44	46
	02	16	47	50	48
	03	17	<b>58**</b>	<b>52**</b>	<b>50**</b>
	04	18	51	51	49
	05	19	51	49	50
	06	20	50	48	49
	07	21	49	51	48
	<b>08*</b>	<b>22</b>	49	<b>51**</b>	50
	09	23	<b>52**</b>	49	48
	10	24	49	50	<b>51**</b>

Continuación Tabla 3. Variación de la temperatura en función del tiempo.  
 Hora: 8:00 A.M.

MES			TEMPERATURA (°C)		
	FECHA	TIEMPO (Días)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
AGOSTO	11	25	50	48	49
	12	26	51	49	48
	13	27	49	51	50
	14	28	46	46	45
	<b>15*</b>	<b>29</b>	46	47	46
	16	30	<b>48**</b>	<b>49**</b>	<b>48**</b>
	17	31	47	48	48
	18	32	46	46	45
	19	33	44	44	45
	20	34	41	42	40
	21	35	36	36	37
	<b>22*</b>	<b>36</b>	<b>38**</b>	<b>37**</b>	<b>37**</b>
	23	37	30	31	32
	24	38	28	27	30
	25	39	27	27	28
	26	40	26	28	27
	27	41	26	27	26
	28	42	28	28	29
	<b>29*</b>	<b>43</b>	27	25	27
	30	44	28	27	28
	31	45	<b>35**</b>	<b>35**</b>	<b>33**</b>
SEPTIEMBRE	01	46	43	41	42
	02	47	46	47	48
	03	48	47	48	<b>49**</b>
	04	49	<b>50**</b>	<b>49**</b>	47
	<b>05*</b>	<b>50</b>	47	50	48
	06	51	46	47	49
	07	52	48	48	48
	08	53	47	47	46
	09	54	43	46	45
	10	55	27	26	28
	11	56	24	23	23
	<b>12*</b>	<b>57</b>	23	24	22
	13	58	22	23	22
	14	59	22	22	22
	15	60	20	21	20

\* Corresponde a los días en que se realizó el volteo de la pila.

\*\* Máxima temperatura alcanzada en la pila de compostaje.

Figura 23. Variación de la temperatura en función del tiempo. Hora 8:00A.M.

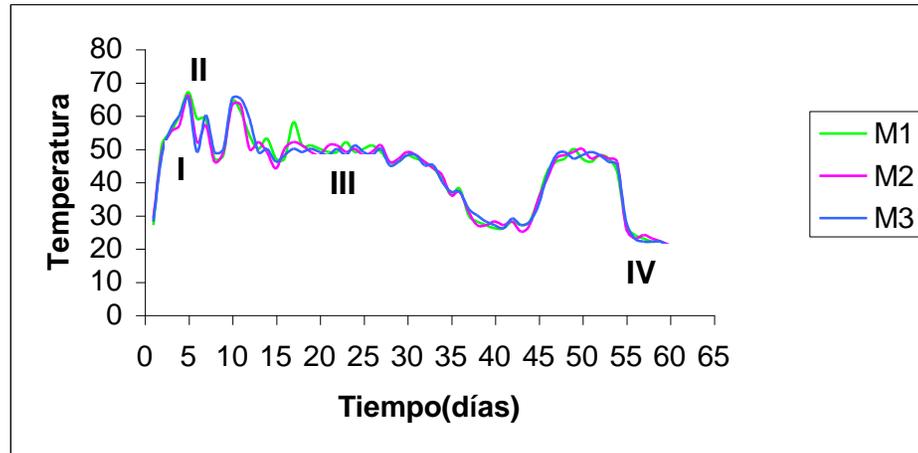


Tabla 4. Variación de la temperatura en función del tiempo.  
Hora: 2:00 P.M.

MES			TEMPERATURA (°C)		
	FECHA	TIEMPO (Días)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
JULIO	18	1	30	30	30
	19	2	51	55	53
	20	3	57	61	59
	21	4	58	57	56
	22	5	59	59	60
	23	6	<b>67**</b>	<b>65**</b>	<b>63**</b>
	24	7	53	55	57
	<b>25*</b>	<b>8</b>	52	53	51
	26	9	59	63	61
	27	10	<b>65**</b>	<b>64**</b>	<b>64**</b>
	28	11	58	55	57
	29	12	56	54	53
	30	13	53	51	50
	31	14	50	48	49
AGOSTO	<b>01*</b>	<b>15</b>	50	49	48
	02	16	52	50	49
	03	17	<b>58**</b>	57	<b>59**</b>
	04	18	57	<b>58**</b>	57
	05	19	53	54	52
	06	20	50	52	50
	07	21	53	50	52
	<b>08*</b>	<b>22</b>	50	51	52
	09	23	49	52	50
	10	24	50	48	49

Continuación Tabla 4. Variación de la temperatura en función del tiempo.  
Hora: 2:00 P.M.

MES			TEMPERATURA (°C)		
	FECHA	TIEMPO (Días)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
AGOSTO	11	25	<b>52**</b>	<b>51**</b>	<b>51**</b>
	12	26	51	50	50
	13	27	48	49	49
	14	28	49	49	48
	<b>15*</b>	<b>29</b>	48	48	48
	16	30	<b>49**</b>	<b>48**</b>	47
	17	31	47	47	<b>48**</b>
	18	32	48	45	46
	19	33	47	45	46
	20	34	44	45	46
	21	35	37	37	38
	<b>22*</b>	<b>36</b>	<b>37**</b>	<b>37**</b>	<b>36**</b>
	23	37	33	30	32
	24	38	27	26	27
	25	39	28	29	30
	26	40	27	27	28
	27	41	28	26	27
	28	42	27	28	28
	<b>29*</b>	<b>43</b>	26	26	27
	30	44	27	26	28
	31	45	<b>37**</b>	<b>37**</b>	<b>34**</b>
SEPTIEMBRE	01	46	46	45	26
	02	47	49	48	38
	03	48	51	49	45
	04	49	49	47	49
	<b>05*</b>	<b>50</b>	<b>51**</b>	<b>48**</b>	<b>48**</b>
	06	51	48	49	46
	07	52	47	46	47
	08	53	46	44	47
	09	54	37	40	47
	10	55	26	25	46
	11	56	23	23	41
	<b>12*</b>	<b>57</b>	22	21	24
	13	58	22	24	24
	14	59	23	24	23
	15	60	20	22	23

\* Corresponde a los días en que se realizó el volteo de la pila.

\*\* Máxima temperatura alcanzada en la pila de compostaje.

Figura 24. Variación de la temperatura en función del tiempo.

Hora  
P.M.

2:00

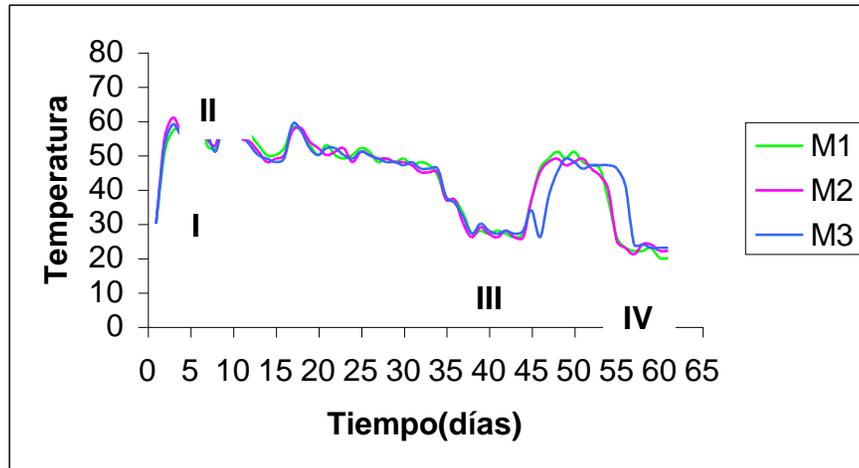


Tabla 5. Variación de la temperatura en función del tiempo.

Hora: 6:00 P.M.

MES			TEMPERATURA (°C)		
	FECHA	TIEMPO (Días)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
JULIO	18	1	28	27	27
	19	2	50	50	52
	20	3	55	52	48
	21	4	56	52	49
	22	5	<b>63**</b>	<b>65**</b>	<b>67**</b>
	23	6	60	63	64
	24	7	50	54	52
	<b>25*</b>	<b>8</b>	49	50	48
	26	9	<b>59**</b>	<b>61**</b>	<b>58**</b>
	27	10	56	55	57
	28	11	48	50	49
	29	12	49	58	51
	30	13	52	49	48
	31	14	51	50	49
AGOSTO	<b>01*</b>	<b>15</b>	50	49	51
	02	16	49	48	49
	03	17	<b>53**</b>	<b>49**</b>	<b>52**</b>
	04	18	52	51	50
	05	19	51	51	49
	06	20	48	52	50
	07	21	49	50	49
	<b>08*</b>	<b>22</b>	51	51	50
	09	23	<b>52**</b>	<b>49**</b>	<b>50**</b>

	10	24	49	48	49
--	----	----	----	----	----

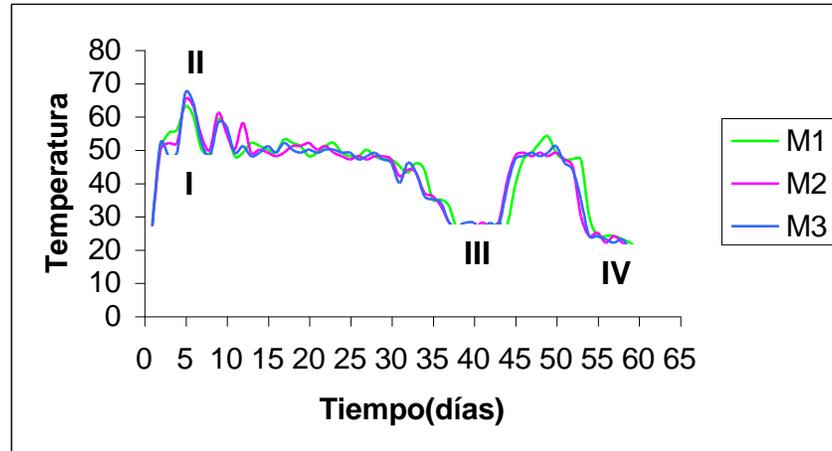
Continuación Tabla 5. Variación de la temperatura en función del tiempo.  
Hora: 6:00 P.M.

MES			TEMPERATURA (°C)		
	FECHA	TIEMPO (Días)	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
AGOSTO	10	24	49	48	49
	11	25	48	47	49
	12	26	48	48	47
	13	27	50	47	48
	14	28	48	48	49
	<b>15*</b>	<b>29</b>	<b>47**</b>	<b>48**</b>	<b>47**</b>
	16	30	47	47	46
	17	31	45	42	40
	18	32	43	44	46
	19	33	46	43	43
	20	34	44	37	36
	21	35	35	36	35
	<b>22*</b>	<b>36</b>	<b>35**</b>	<b>33**</b>	<b>34**</b>
	23	37	33	28	28
	24	38	26	26	27
	25	39	27	27	28
	26	40	26	26	28
	27	41	27	28	26
	28	42	26	27	28
	<b>29*</b>	<b>43</b>	28	28	27
30	44	27	40	38	
SEPTIEMBRE	31	45	39	48	47
	01	46	<b>47**</b>	<b>49**</b>	<b>48**</b>
	02	47	49	48	49
	03	48	52	49	48
	04	49	54	48	49
	<b>05*</b>	<b>50</b>	<b>49**</b>	<b>49**</b>	<b>51**</b>
	06	51	47	47	46
	07	52	47	45	44
	08	53	47	30	35
	09	54	30	24	24
	10	55	24	25	24
	11	56	24	22	23
	<b>12*</b>	<b>57</b>	24	24	22
	13	58	23	22	23
	14	59	22	20	20
15	60	20	20	20	

\* Corresponde a los días en que se realizó el volteo de la pila.

\*\* Máxima temperatura alcanzada en la pila de compostaje.

**Figura 25. Variación de la temperatura en función del tiempo.  
Hora 6:00 P.M.**



Según los datos presentados en las tablas 3, 4 y 5 y sus respectivas figuras 23, 24 y 25 se observa en general, en todas las curvas, un incremento de la temperatura en función del tiempo, aumentando progresivamente desde los 28°C, de tal manera que se estimula el crecimiento de la microflora mesofílica, es decir, que entre los días segundo y cuarto se presenta la **etapa mesofílica (I)**. Este aumento inicial de la temperatura representa una retención del calor en la pila de compostaje, producido como residuo metabólico en la principal forma del metabolismo microbiano y que tiende a ser retenido en la matriz, por el aumento del crecimiento de microorganismos que degrada los sustratos simples en el residuo.

Posteriormente, después del cuarto día, entre el quinto y el sexto, la temperatura alcanza valores superiores a los 57°C, ocurriendo así la **etapa termofílica (II)**, llegando hasta un máximo promedio de 66°C, indicando que se ha presentado gran actividad por parte de los microorganismos termófilos que degradan lignina, sustrato más complejo. Este incremento en el valor de temperatura es muy importante puesto que además de la lignocelulólisis propia de esta etapa, se presenta la reducción o supresión de microorganismos patógenos para las plantas y el hombre. Alcanzada la etapa termofílica, es un buen indicio para el compost maduro, ya que presentará una MO estabilizada libre de fitotoxinas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos.

El valor de la máxima temperatura en ningún caso supera los 70°C, aspecto favorable en este proceso, indicando que en el transcurso del compostaje de estos

materiales, no se presenta ignición por parte de la sustancia orgánica, fenómeno que empobrecería en extremo la sustancia orgánica a degradar.

La etapa termofílica, continúa después del sexto día, no obstante se presenta una reducción en la temperatura, disminuyendo así la actividad microbiana, por lo tanto, el sistema pierde calor, dando paso al inicio de la **etapa de enfriamiento (III)** después del día treinta y cuatro aproximadamente.

Sin embargo, se observa que, después del día octavo, se presenta nuevamente un ligero incremento en la temperatura, atribuible al hecho de que la pila es volteada, con el fin de mejorar la aireación del sistema. Esto permite que la temperatura de la masa del sistema de compostables se eleve, implicando un reinicio de la actividad microbiana para degradar moléculas que han sido parcialmente degradadas o que aún no han sido degradadas.

Después del día cuarenta y seis aproximadamente, la temperatura de la pila aumenta súbitamente, debido a que en esta fecha, se adiciona agua al sistema, puesto que la humedad en ese momento no es favorable para las reacciones enzimáticas llevadas a cabo en la degradación de la MO, como se detecta en la tabla 6. No obstante, la temperatura alcanzada (50°C) entre los días cuarenta y nueve y cincuenta y uno, no supera la temperatura máxima alcanzada en la verdadera etapa termofílica. Indicando menor actividad de la microflora termofílica debido a que la descomposición de la MO ya está terminando.

Por último se detecta del día cincuenta y uno en adelante, la **etapa de maduración (IV)** alcanzando valores de temperatura ambiente que fluctúan entre los 25 y 22°C. Etapa que comprende un período de 10 días.

En general no se observan diferencias significativas para los datos provenientes de los tres muestreos ( $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ ) que se llevan a cabo en las diferentes horas del día en la pila de compostaje, es decir, que existe homogeneidad en el proceso. Sin embargo, el valor de temperatura para la muestra tomada de la parte superior ( $M_1$ ), respecto de las otras dos, supera muy ligeramente en uno o dos °C, indicando que en esta parte de la pila existe más aireación, por lo tanto mejores condiciones de aireación que favorecen más el proceso de degradación de los diferentes sustratos. También se observa que existe homogeneidad en los datos registrados para las diferentes horas del día, indicando que la actividad por parte de los microorganismos es constante y no es afectada por las condiciones climáticas. El cumplimiento de las cuatro etapas en el proceso de compostaje observado en toda la pila, indica que las condiciones de aireación y de humedad son adecuadas para garantizar un apropiado proceso de compostaje.

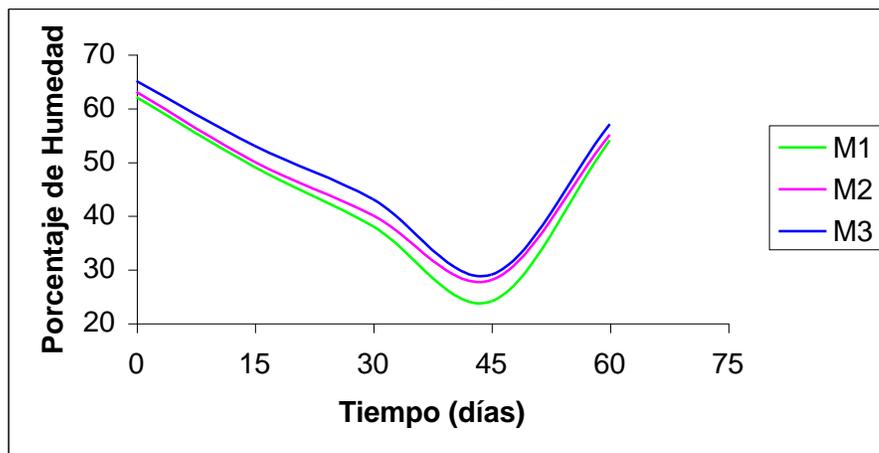
### 5.2.2. Humedad

Los datos para los diferentes valores del porcentaje de humedad se presentan en la tabla 6 y la figura 26.

**Tabla 6. Variación del porcentaje de humedad (base húmeda) en función del tiempo**

MUESTRA	HUMEDAD Tiempo (Días)				
	0	15	30	45	60
M <sub>1</sub>	62	49	38	24	54
M <sub>2</sub>	63	50	40	28	55
M <sub>3</sub>	65	53	43	29	57
PROMEDIO	63	51	40	27	55

**Figura 26. Variación del porcentaje de humedad (base húmeda) en función del tiempo**



Como se observa en la figura 26, la humedad promedio inicial para las tres muestras es del 63%, dato muy cercano a la humedad óptima para la máxima eficiencia en el proceso de compostaje, comprendido en un rango de 50 a 62% <sup>(42)</sup> indicando una adecuada mezcla de compostables, como lo son los residuos o desechos de galería, los cuáles presentan un alto valor de humedad, propiedad que les permite ser considerados como aptos para el desarrollo de un buen proceso de compostaje.

Es importante mencionar que a medida que avanza el proceso, se observa una disminución del porcentaje de humedad, debido a la producción de energía en forma de calor y la consecuente pérdida de agua por evaporación. Se observa a los cuarenta y cinco días que en las tres muestras, el valor de la humedad desciende considerablemente, siendo más pronunciado ese descenso en la muestra M<sub>1</sub> debido a que en la superficie se permite mayor evaporación. Por esta razón se hizo necesario reiniciar el proceso con la adición de agua para humedecer la pila de compostaje con el fin de garantizar el buen desarrollo del proceso, observándose gráficamente en el incremento en el porcentaje de humedad aproximadamente a los cuarenta y seis días.

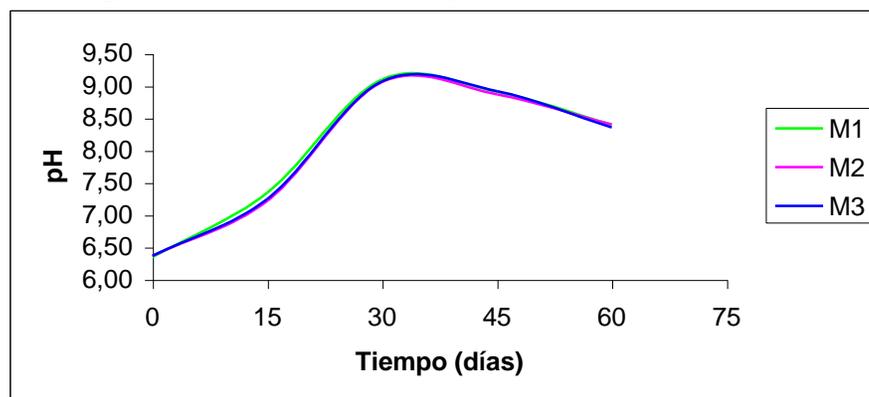
### 5.2.3. pH

Los datos para los diferentes valores de pH se presentan en la Tabla 7 y la figura 27.

**Tabla 7. Variación del pH en función del tiempo**

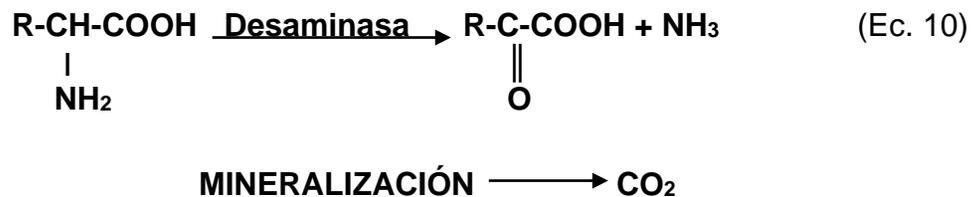
MUESTRA	pH Tiempo (Días)				
	0	15	30	45	60
M <sub>1</sub>	6.35	7.35	9.10	8.91	8.40
M <sub>2</sub>	6.37	7.22	9.06	8.87	8.40
M <sub>3</sub>	6.37	7.25	9.07	8.92	8.36
PROMEDIO	6.36	7.27	9.08	8.90	8.39

**Figura 27. Variación del pH en función del tiempo**



Según los datos presentados en la tabla 7, se observa que el pH inicial de la pila de compostaje, se encuentra en 6.36, este dato fue obtenido a partir de un promedio de los tres muestreos realizados en la pila, valor óptimo para iniciar un proceso de compostaje <sup>(43)</sup>, en términos de lograr una adecuada descomposición aeróbica-termofílica del material.

En general se observa que en las tres muestras el valor del pH aumenta a medida que transcurre el proceso de compostaje, debido a la degradación de proteínas y liberación de amoníaco de los aminoácidos y a la mineralización y consecuente liberación de bases como calcio y magnesio. Alcanzando un valor máximo promedio de 9.08 en un período de treinta días. Este incremento ocurre durante la etapa termofílica que es cuando existe la mayor actividad microbiana donde ocurre el proceso de mineralización como se mencionó anteriormente. La etapa de amonificación en esta mineralización implica la reacción descrita en la ecuación 10.



Posteriormente, cuando el proceso ha entrado en la etapa de enfriamiento, después de treinta días, se observa que el pH cae ligeramente llegando a un valor de 8.39, el cual corresponde prácticamente, al valor del compost maduro. Estos resultados indican que el proceso de aireación de la pila, llevado a cabo cada ocho días mediante un movimiento translacional, es adecuado, es decir no se presentan condiciones anaeróbicas, dado que el pH no presenta valores entre 4-5, que pueden impedir un adecuado proceso de compostaje. Sin embargo, el máximo valor de pH para un adecuado proceso de compostaje no debe ser superior a 8.5 <sup>(44)</sup>, ya que de lo contrario, empieza a ocurrir un proceso de mineralización de los AH formados para convertirse en AF disminuyendo así el grado de humificación y por lo tanto afectando la calidad del compost obtenido.

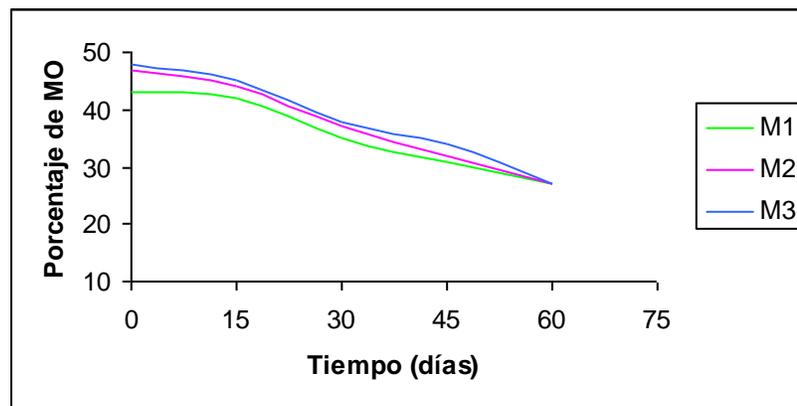
#### 5.2.4. Materia Orgánica

Los datos para los diferentes valores de MO se presentan en la Tabla 8 y figura 28.

**Tabla 8. Variación de la Materia Orgánica en función del tiempo**

MUESTRA	MO Tiempo (Días)				
	0	15	30	45	60
M <sub>1</sub>	43	42	35	31	27
M <sub>2</sub>	47	44	37	32	27
M <sub>3</sub>	48	45	38	34	27
PROMEDIO	46	44	37	32	27

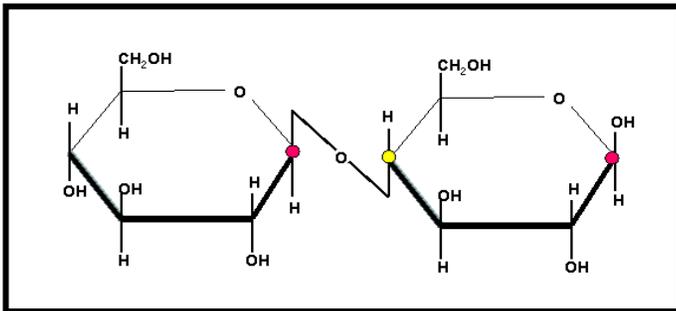
**Figura 28. Variación de la Materia Orgánica en función del tiempo**



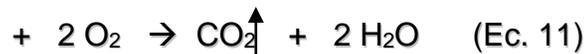
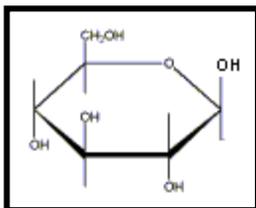
Los datos registrados en la tabla 8 indican que la mezcla de materiales a compostar presenta un valor inicial promedio de 46% MO siendo ligeramente inferior al valor apropiado (50%), <sup>(44)</sup> sin embargo, el valor determinado no es tan bajo para afirmar que la mezcla no es adecuada fuente de carbono y de energía necesaria para la proliferación de microorganismos, y que no existe suficiente material que al degradarse sirve posteriormente como fuente de nutrientes para las plantas y originará moléculas estables similares a las SH que permitan dar estabilidad al compost, además de producir una alta retención y solubilización de nutrientes. Esta deficiencia en MO podría solucionarse si la tierra negra se adiciona al inicio del proceso y no al final.

A medida que transcurre el tiempo se observa una disminución continuada de la MO, indicando que el proceso de degradación u oxidación de la MO se está llevando a cabo, mediante diferentes vías de transformación de la MO, tales como la **HIDRÓLISIS-CELULÓLISIS**: de la celulosa y hemicelulosa respectivamente, que conduce a la producción de azúcares sencillos. De acuerdo a las siguientes reacciones:

1) Hidrólisis de enlaces Glu-Glu



2) Oxidación de Glucosa

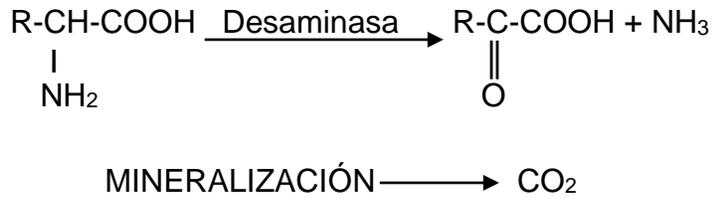


Otros procesos conocidos son la **PROTEÓLISIS**: de las proteínas, para dar lugar a la formación de péptidos, aminoácidos y posteriormente estos son mineralizados hasta amoníaco cuyas etapas comprenden las siguientes reacciones:

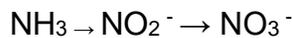
- **Hidrólisis:**



- **Amonificación:**



- **Nitrificación:**



(Nitrobacter-Nitrosomonas, Bacillus penicillium)

**SAPONIFICACIÓN E HIDRÓLISIS:** de lípidos (ceras, ésteres complejos).

**HIDRÓLISIS Y OXIDACIÓN:** polímeros fenólicos (pigmentos, lignina, taninos).

**HIDRÓLISIS DE OTRAS SUSTANCIAS:** como alcaloides, terpenos y ácidos nucleicos. Otros productos de esta transformación pueden ser el dióxido de carbono, vapor de agua y amoníaco. En la fotografía mostrada en la figura 29 se pueden apreciar los lixiviados del material compostable, que mezclados con aserrín vuelven a la pila de compostaje.

Cuando han transcurrido sesenta días del proceso, se ha degradado alrededor de un 60% de la MO inicial correspondiente principalmente a macromoléculas como carbohidratos, proteínas, entre otras y que probablemente se han sintetizado nuevas macromoléculas como los AH, AF y huminas. Además por procesos de **NEOSÍNTESIS** los microorganismos han incorporado o sintetizado macromoléculas para formar nuevas células, como proteínas que constituyen una reserva protoplasmática de nitrógeno orgánico.

Polisacáridos sencillos como el dextrano, reorganizando azúcares para sintetizar polisacáridos como los poliurónicos que cumplen un papel importante en la estabilidad estructural del suelo.

**Figura 29. Lixiviados de la pila de Compostaje**



El valor obtenido a los sesenta días para el %MO es del 27% indicando un elevado proceso de mineralización. Este valor se encuentra dentro del rango óptimo reportado en la Norma Técnica Colombiana que es del 25-30% de MO para un compost maduro.

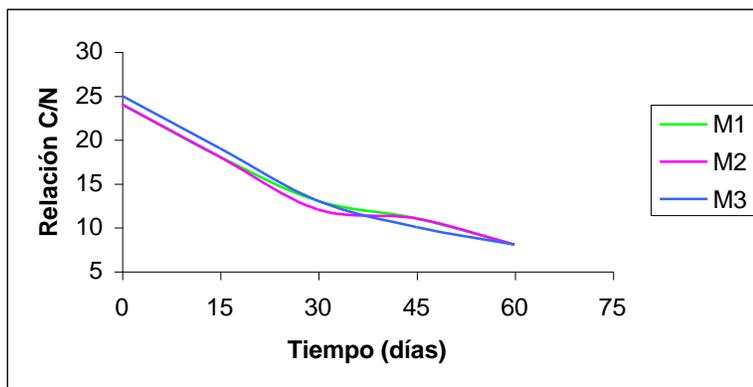
#### **5.2.5. Relación C/N**

Los datos para los diferentes valores de la relación C/N se presentan en la Tabla 9 y la figura 30.

**Tabla 9. Variación de la relación C/N en función del tiempo**

<b>MUESTRA</b>	<b>RELACION C/N</b>				
	<b>Tiempo (Días)</b>				
	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>
<b>M<sub>1</sub></b>	24	18	13	11	8
<b>M<sub>2</sub></b>	24	18	12	11	8
<b>M<sub>3</sub></b>	25	19	13	10	8
<b>PROMEDIO</b>	24	18	13	11	8

**Figura 30. Variación de la relación C/N en función del tiempo**



La relación entre el carbono y el nitrógeno inicial para este compost tomando un promedio para las tres muestras se encuentra dentro del rango óptimo comprendido entre 25-35 para un proceso adecuado de compostaje <sup>(44)</sup>. En un período de quince días de transcurrido el proceso, se adquiere un valor inferior a 20, valor considerado como un índice de madurez y como indicativo para medir la descomposición y liberación de nitrógeno en forma disponible. Estos resultados son semejantes a los reportados por otros autores <sup>(45)</sup>. Después de quince días la relación C/N disminuye considerablemente, indicando una continúa mineralización y se observa que en el día cuarenta y cinco el valor de esta relación es apropiado para un compost. Sin embargo después de este día, continúa la mineralización ya que la relación C/N sigue disminuyendo a valores inferiores a 12, significando así una fuerte mineralización y posiblemente un bajo grado de madurez de este abono. Si se observa la figura 26 en este día cuarenta y cinco se agrega más agua a la pila de compostaje activando nuevamente la proliferación de microorganismos descomponedores y como el valor de pH en este día aún se encuentra en valores superiores a 8.5, es probable que los AH sintetizados hasta el momento, sufran mineralización nuevamente a moléculas más pequeñas y por esto la relación C/N continúa disminuyendo. Sin embargo, el día sesenta esta relación se estabiliza en 8, que de acuerdo a Kiehl et al (1993) <sup>(46)</sup> no es apropiado para un abono orgánico.

### **5.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y GRADO DE MADUREZ DEL COMPOST**

Con el objeto de evaluar la calidad y el grado de madurez del abono obtenido mediante este proceso de compostaje, se realizan análisis físicos y químicos que comprenden determinación de humedad, densidad, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, pérdidas por volatilización, pH, MO, relación C/N, CIC, nitrógeno; así como la separación de la MOF y MOH y análisis de cada una

de estas fracciones, además se realiza la evaluación de los índices de humificación HR<sub>1</sub> y HR<sub>2</sub>. El proceso de compostaje en la Planta los Arrayanes termina en un período de dos meses, por lo tanto este se considera como el tiempo final en la obtención del compost.

Para que este abono sea comercializable debe cumplir los parámetros técnicos establecidos por ICONTEC en la norma de 204/02 <sup>(47)</sup> y científicos establecidos por la Sociedad Internacional de SH <sup>(48)</sup>. De acuerdo a esta norma, el compost obtenido se clasifica como un **Abono o Fertilizante Orgánico**.

### **5.3.1 Análisis Físicos y Químicos del Compost Maduro**

Los resultados del análisis del compost se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10. Resultados generales del análisis del Compost**

PARAMETROS	MUESTRA			PROMEDIO
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>				
Humedad (%) de campo	57.18	57.67	57.29	57.38
Humedad (%) en base seca	16.43	16.34	17.05	16.61
Densidad (g/mL)	0.60	0.61	0.60	0.60
Conductividad eléctrica (mS/cm)	90.88	93.50	92.11	92.16
Capacidad de retención de agua (%)	134.7	145.2	140.6	140.17
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>				
pH relación 2:1 en base húmeda	8.34	8.34	8.33	8.34
pH relación 2:1 en base seca	8.06	8.04	8.04	8.05
Cenizas (%)	54.14	54.94	55.19	54.76
Pérdidas por volatilización (%)	45.86	45.76	44.81	45.48
∑ (Volatilización, Cenizas)	100	100	100	100
Carbono orgánico (%)	15.75	15.71	15.78	15.75
Materia orgánica (%)	27.15	27.08	27.20	27.14
Nitrógeno (%)	2.01	1.99	1.97	1.99
Relación C/N	7.84	7.89	8.01	7.91
CIC (meq/100g)	62.54	65.32	63.03	63.63
Ca <sup>2+</sup> intercambiable (meq/100g)	26.95	29.51	25.19	27.22
Mg <sup>2+</sup> intercambiable (meq/100g)	10.92	9.78	10.01	10.24
Ca/Mg	10.60	8.34	5.85	8.26
Na <sup>+</sup> intercambiable (meq/100g)	0.25	0.22	0.20	0.22
K <sup>+</sup> intercambiable (meq/100g)	38.22	33.31	31.68	34.40
P total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (%)	2.09	2,03	2,01	2.04
P disponible (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (%)	0.80	0.90	0.74	0.81
K <sub>2</sub> O total	1.82	1.66	1.70	1.73
Na (%)	0.43	0.41	0.30	0.38
∑ N, P, K	5.92	5.68	5.68	5.76
CaO(%) total	7.95	6.34	4.21	6.17
MgO(%) total	0.75	0.76	0.72	0.74
Ca disponible (%)	9.43	13.03	16.74	13.07
Mg disponible (%)	29.33	25.92	27.78	27.68
Na disponible (%)	13.54	12.71	15.10	13.78
K disponible (%)	98.90	94.58	87.65	93.71
Fe (ppm)	1895.85	1706.18	1712.15	1771.39
Mn (ppm)	452.49	450.10	396.42	433.00
Cu (ppm)	1212.73	1351.90	954.88	1173.17
Zn (ppm)	232.21	223.46	236.45	230.71

### 5.3.1.1. Análisis de las propiedades Físicas

- **Humedad en Base Seca**

Se observa en la tabla 10 que las 3 réplicas de compost, reportan una humedad comprendida entre el 16 y 17%, valor ligeramente inferior al óptimo (20%) de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana. Esta humedad garantiza una estabilidad del abono orgánico evitando así el fenómeno de diestéresis y de reacción dentro del empaque donde se almacena.

- **Conductividad Eléctrica**

Según la norma ICONTEC no existe un valor apropiado de conductividad eléctrica para un abono orgánico. Comparando el valor encontrado en este abono con el de abonos orgánicos tipo Bocashi realizados por Medina et al (2004) <sup>(49)</sup>, se encuentran valores muy similares cercanos a 92 ms/cm, indicando un alto contenido de sales solubles, provenientes de calcio, magnesio y principalmente de potasio, ya que según esta tabla estos valores son altos, siendo así favorable para abonar plantas en suelos ácidos como los del Cauca en donde existe gran deficiencia de estos cationes. Presenta la ventaja de un bajo contenido de sales provenientes de sodio, las cuales producen serios problemas de acumulación de sodio en la capa intercambiable, originando posteriormente problemas al suelo. Esta conductividad también está relacionada con la alta CIC encontrada para este abono y con el alto contenido de cenizas.

- **Densidad**

Según la Norma Técnica Colombiana, la densidad de un abono orgánico debe ser máximo de 0.6 g/cm<sup>3</sup>, que es el valor encontrado para el abono en estudio indicando que presenta densidad apropiada para ser un abono orgánico. La densidad para un bioabono está relacionada con el contenido de MO y el grado de humificación, ya que si presenta una buena estructura, sus partículas migajozas permiten una forma esférica con alta superficie específica suministrando una buena aireación, drenaje y retención de agua.

- **Porcentaje de Saturación o Capacidad de Retención de Agua**

Los valores de porcentaje de retención de agua superan su propio peso, por lo tanto cumplen con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana, relacionado con el contenido de MO presente en el abono y como se mencionó anteriormente a una adecuada bioestructura.

El elevado valor para el porcentaje de saturación de agua indica que este bioabono aplicado al suelo en condiciones de sequía ayudaría a mantener el agua disponible para las plantas.

- **Pérdidas por Volatilización**

De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana el valor apropiado de cenizas debe estar dentro de un rango de 18-56%, los valores de cenizas para M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub> reportados en la tabla 10 cumplen con la norma, este porcentaje está relacionado con el contenido de material inorgánico presente en el abono, indicando nuevamente un alto contenido de minerales como se analizó anteriormente. Un adecuado valor para el porcentaje de cenizas y MO, implica menores pérdidas por volatilización, menor material orgánico volátil, es decir un mayor contenido de carbón orgánico fijo, que significa presencia de sustancias húmicas estables no volátiles que le confieren a este abono estabilidad química, que al llegar al suelo favorecerán la formación de complejos arcillo-húmicos estables que permiten la formación de un humus apropiado confiriéndole de esta manera una adecuada bioestructura al suelo.

### **5.3.1.2 Valoración de las propiedades Químicas**

- **pH**

Los valores de pH de este abono en M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub> se encuentran en un valor óptimo según lo reportado en la Norma Técnica Colombiana que es de 6-8.5, lo cual va a favorecer el desarrollo de los microorganismos teniendo un medio apropiado para desarrollar sus actividades biológicas degradando la MO, obteniendo así elementos disponibles para un buen desarrollo de las plantas. Así mismo, contribuir en la formación de un humus estable que conlleva al

mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo al ser aplicado a este.

- **Materia Orgánica**

En M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub> el contenido de MO, está dentro del rango óptimo comprendido entre 25-30% según la Norma, siendo el abono una fuente apropiada de MO para un suelo meteorizado con un bajo nivel de ésta. Pero también puede ser aplicado en suelos con alto contenido de MO suministrando una carga microbiana y enzimática que ayude a transformar la MO acumulada para efectuar un buen proceso de mineralización y humificación.

Además la cantidad de MO presente en este abono contribuye a evitar pérdidas de nitrógeno por lixiviación y/o volatilización impidiendo la conversión de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a NH<sub>3</sub>, gas que pasando a la atmósfera produce contaminación por el efecto invernadero. De otra parte, la MO provee al abono alta CIC, capaz de retener bases de cambio y evitando su pérdida por lixiviación.

Además esta MO suministra al suelo capacidad buffer, para evitar cambios bruscos de pH causados por la mayoría de los fertilizantes químicos utilizados en nuestro medio. Otro aspecto favorable de la MO de este abono es su capacidad para quelatar Aluminio (Al) de suelos ácidos impidiendo que pase a la solución del suelo y evitando de esta manera sus efectos perjudiciales <sup>(50)</sup>.

- **Nitrógeno**

El porcentaje de nitrógeno en el compost está alrededor del 2%. Aún cuando la Norma no estipula el valor óptimo para este elemento, sí plantea expresar su contenido si este es mayor del 1%. Se puede decir que este abono tiene la posibilidad de actuar como fuente principal de nitrógeno cuando aplicado al suelo deficiente en este nutriente, mejoraría sus condiciones de fertilidad.

Sin embargo un alto contenido de nitrógeno no garantiza mejor calidad en un bioabono, por eso se debe tener en cuenta la relación C/N, que indica si existe un proceso de mineralización adecuado. Si la relación es muy pequeña, no hay suficiente carbono para los microorganismos, que hacen uso del nitrógeno

incrementando las pérdidas por volatilización de  $\text{NH}_3$ , de manera inversa; si la relación es muy alta el proceso de compostaje se vuelve lento o se presenta una deficiencia de nitrógeno para los microorganismos.

En este bioabono el valor de la relación C/N, es muy cercana a 8 y según Kiehl et al (1993) <sup>(51)</sup> un humus maduro debe llegar a una relación C/N de 12. Por lo tanto, esta relación es baja, indicando una fuerte mineralización de la MO, producto de la alta cantidad de microorganismos presentes, pero además una deficiencia inicial de MO como se manifestó anteriormente.

- **Capacidad de Intercambio Catiónico**

Según la norma ICONTEC el valor mínimo es de 30 meq/100g para un compost maduro, la CIC que se obtiene para el abono es alta debido al porcentaje de MO. Además, el abono presenta valores óptimos de humedad y pH que son unas de las condiciones ideales que garantizan una alta retención de nutrientes disponibles tanto para el suelo como para las plantas.

Una alta CIC indica una alta capacidad de intercambiar bases con la solución del suelo y es probable que por este motivo, indique que el material tiene un alto grado de humificación. La CIC es típica de las SH por ser coloides electronegativos capaces de retener cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  todos ellos, elementos fertilizante fijados por el complejo arcilloso-húmico y que están en constante equilibrio con los cationes de la solución del suelo.

De otra parte el complejo coloidal proporciona iones a la solución del suelo si su concentración desciende; contrariamente si ésta aumenta, los cationes se desplazan hacia la fase coloidal hasta llegar nuevamente al equilibrio. Las consecuencias derivadas de este hecho son la disponibilidad de una buena reserva de nutrientes de fácil asimilación además de estar protegidos contra la lixiviación. <sup>(52)</sup>

- **Contenido de Fósforo**

Según los datos reportados en la tabla 10 el porcentaje de fósforo en el compost está alrededor del 2%. De igual forma que el nitrógeno, la Norma no estipula el

valor óptimo para este elemento, pero sí plantea expresar su contenido si este es mayor del 1%.

Por lo anterior se podría considerar este bioabono como fuente de fósforo para el suelo. Se puede atribuir probablemente a la MOH que presenta sustancias como la fitina fuente de este nutriente. De acuerdo al valor de pH de este abono es posible que al llegar al suelo se impida la adsorción del fósforo, la cual ocurre a valores ácidos de pH principalmente por el Aluminio formando precipitados que impiden su absorción por las plantas, es decir que el pH del bioabono favorece la disponibilidad del fósforo para las plantas.

- **Contenido de K<sub>2</sub>O**

De acuerdo a los rangos establecidos por la Asociación Alemana para la calidad del compost <sup>(53)</sup> el contenido de potasio adecuado para un bioabono está en el rango del 1-3 % de K<sub>2</sub>O. El bioabono cumple con este requisito indicando que puede ser fuente de este nutriente para el suelo. El potasio puede provenir de residuos utilizados para la elaboración del compost ricos en este nutriente como la paja, las tusas de maíz y la mezcla de las vainas de leguminosas al igual que el tallo de la yuca.

Del anterior análisis se deduce que este compost obtenido se puede considerar fuente de los tres macronutrientes principales, pero que sería necesario formularlo si se desea considerar este compost como un abono órganomineral. Sin embargo, según los rangos establecidos por la asociación Alemana para la calidad del compost BGGK <sup>(53)</sup>: N (1-3%), P (<de 1%), K (1-3%), y de acuerdo Kiehl et al (1993) <sup>(54)</sup> quien reporta valor mínimo de 6, el bioabono cumpliría con este requisito y realmente puede ser considerado como fuente de macronutrientes.

- **Contenido de CaO**

Con base en el requisito establecido por la Norma ICONTEC, este abono supera el valor mínimo del 2% para el contenido de calcio, indicando que es una fuente rica en este nutriente y probablemente proviene de los huesos de origen vacuno y de la cal agrícola adicionada como insumo para regular el pH (figura 31). Es importante resaltar que el abono en estas condiciones es adecuado para suelos ácidos como los del Cauca donde generalmente debido a la muy fuerte acidez, este elemento se pierde fácilmente por lixiviación. Este alto contenido de calcio

hace un aporte significativo a la CIC, altamente ventajosa para un fertilizante organomineral.

**Figura 31. Adición de cal agrícola y Hueso incinerado, importantes fuentes de calcio para el Bioabono**



- **Contenido de MgO**

De acuerdo a la norma ICONTEC el contenido de MgO debe ser de 2%. El abono presenta una fuerte deficiencia en el contenido total de este nutriente, manifestada en la muy alta relación Ca/Mg (8.3). Por lo tanto para aplicar este abono al suelo sería necesario formularlo con una fuente de Mg. Esta deficiencia se puede subsanar desde el inicio del proceso del compostaje si en lugar de agregar cal agrícola se reemplaza por cal dolomita fuente de los dos nutrientes.

- **Contenido de Na**

La norma ICONTEC no reporta un valor apropiado de porcentaje de sodio para un abono orgánico. Comparando el valor encontrado en este abono con el de abonos orgánicos tipo Bocashi, se encuentra que este bioabono presenta valores inferiores (<1%) de acuerdo a los datos reportados por Medina et al (2004) <sup>(55)</sup>, aspecto favorable ya que de esta manera no presenta riesgos de salinización por este elemento.

- **Microelementos**

Según Arango et al (1999) <sup>(56)</sup> y Bravo et al (2001) <sup>(57)</sup> el contenido de cobre en un bioabono propuesto por la asociación Alemana para la calidad del compost, BGGK debe ser mínimo de 43 ppm, pero de acuerdo a Kiehl et al (1993) <sup>(58)</sup> para que un abono orgánico sea considerado como fuente de este nutriente, el contenido debe ser de 500 ppm. El abono obtenido supera ampliamente este valor (tabla 10), sin embargo, el cobre forma un complejo muy estable con las SH del tipo Cu-O-C(O)-AH, Boid et al (1981) <sup>(59)</sup> que impedirían un efecto tóxico de este elemento en cualquier tipo de suelo.

Con respecto al zinc la misma Norma no reporta ningún valor para este micronutriente sin embargo la Asociación Alemana para la calidad del compost BGGK y Cegarra et al (1983) establecen un valor mínimo de 233ppm <sup>(60)</sup>. En este caso el abono presenta valores promedio de 231 ppm es decir que este abono puede ser considerado como fuente de este micronutriente.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, no es necesario formular el bioabono con alguna fuente de estos nutrientes.

Con respecto al hierro y el manganeso, la Norma Técnica Colombiana no reporta requerimientos para estos microelementos, sin embargo de acuerdo a Kiehl et al (1993) <sup>(61)</sup> para un bioabono el contenido de hierro debe ser 1000ppm y de manganeso de 200ppm. El abono analizado presenta 1771 ppm de hierro y 433 de manganeso, nuevamente superando los límites propuestos por este autor. Sin embargo, debido a la presencia de MO humificada presente en este abono, es posible que estos elementos estén quelatados, por esta razón se podría descartar toxicidad por parte de estos a plantas y los microorganismos.

### **5.3.2. Evaluación del Grado de Humificación**

Con el propósito de evaluar el grado de humificación es necesario inicialmente separar la MO Humificada de la fresca y analizar sus contenidos de carbono para determinar la cantidad de MO presente en cada una de ellas.

### 5.3.2.1. Separación y Análisis de las Fracciones de la Materia Orgánica

Para la separación de estas fracciones de la MO, se utiliza el método granulométrico, ya que éste produce el mínimo de desnaturalización y hace posible estudiar los compuestos orgánicos de las fracciones dispersables. En la tabla 11 se recopilan los porcentajes de rendimiento de la separación granulométrica de las fracciones, observándose que en las tres muestras de abono orgánico analizado, alrededor del 50% del abono es < de 50 $\mu$ , indicando que en la mitad del material se encuentran SH. Sin embargo, se observa que el porcentaje de la fracción > de 100 $\mu$  donde se encuentra la MO no humificada es menor, es decir que existe cierta cantidad de material que falta por humificar. Pero también se detecta material comprendido entre 100-50  $\mu$ , que contiene material con un estado intermedio de humificación. Estos resultados indican que en este periodo de tiempo (dos meses) el proceso de humificación aún no ha terminado y teniendo en cuenta el valor de la relación C/N se puede inferir un alto grado de mineralización prevaleciendo sobre la humificación.

**Tabla 11. Rendimiento de la Separación Granulométrica del Abono**

MUESTRA	FRACCIONES DE LA MO		
	Fracción < 50 $\mu$ MOH %	Fracción >100 $\mu$ MOF %	Fracción 100-50 $\mu$ MOH %
M <sub>1</sub>	48.98	34.3	9.96
M <sub>2</sub>	48.42	34.3	10.86
M <sub>3</sub>	47.02	34.2	10.55
<b>PROMEDIO</b>	48.14	34.3	10.46

En la tabla 12 se representan los datos del contenido de carbono y de MO de cada una de las fracciones.

**Tabla 12. Composición en MOF y MOH de cada una de las Fracciones del Compost**

MUESTRA	MOF		MOH	
	%Corg	%MO	%Corg	%MO
M <sub>1</sub>	6.48	11.17	15.29	26.36
M <sub>2</sub>	6.65	11.46	15.48	26.69
M <sub>3</sub>	6.91	11.91	15.08	26.00
<b>PROMEDIO</b>	6.68	11.51	15.28	26.35

En la tabla 12 se observa que en la fracción < de 50  $\mu$  existe más MO en cada muestra, con respecto a la fracción > de 100  $\mu$  en donde se encuentra la MO sin humificar.

En la tabla 13 se relacionan los resultados de la MOF y MOH del Compost, allí se observa que la MOH supera en tres veces a la MOF, indicando nuevamente que en el tiempo de transformación ha sucedido un proceso de humificación parcial, pero además ha ocurrido un alto proceso de mineralización, puesto que la MO es inferior al contenido inicial. Estos resultados muestran que se tienen condiciones favorables tales como aireación, humedad, entre otras que permiten un proceso de transformación de la MO inicial. Pero que el proceso de humificación aún no ha terminado en el período del compostaje.

**Tabla 13. Composición en MOF y MOH del Compost**

MUESTRA	%MOF	%MOH
M <sub>1</sub>	3.83	12.91
M <sub>2</sub>	3.93	12.92
M <sub>3</sub>	4.07	12.22
<b>PROMEDIO</b>	3.94	12.68

### 5.3.2.2. Extracción y Separación de las Sustancias Húmicas en el Compost y determinación del Índice de Humificación HR<sub>1</sub>

Las SH se consideran como un material heterogéneo constituido por un conjunto de sustancias altamente polimerizadas, de peso molecular relativamente alto, amorfas, con propiedades coloidales e hidrofílicas muy marcadas, de alta CIC, gran cantidad de grupos ácidos y constituidos principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Durante la transformación de la MO en el proceso de compostaje se forman sustancias similares a las SH (AH, AF y Huminas). Se cuantifica el %C en cada una de estas fracciones obtenidas para las 3 réplicas M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>, los resultados se muestran en la tabla 14, donde se presenta parámetros como %C para AH y FF e índice de humificación (HR<sub>1</sub>).

**Tabla 14. Porcentaje de Carbono de Ácidos Húmicos, Fracción Fúlvica y valor del Índice de Humificación HR<sub>1</sub>**

MUESTRA	PARAMETROS		
	% CFF	% CAH	HR <sub>1</sub>
M <sub>1</sub>	1.37	2.34	1.71
M <sub>2</sub>	1.31	2.43	1.85
M <sub>3</sub>	1.38	2.33	1.69
<b>PROMEDIO</b>	1.35	2.37	1.75

El valor del índice de humificación (HR<sub>1</sub>) del compost analizado es de 1.75 indicando un alto grado de humificación, puesto que su valor es superior a 1. Este valor es inferior al encontrado para otros abonos (2.2) obtenidos mediante el mismo proceso pero en tiempo mayor de compostaje, de acuerdo a Bravo et al (2001) <sup>(62)</sup>. Significando que en el tiempo de compostaje utilizado en la Planta Los Arrayanes el proceso de humificación aún no ha terminado y que prevalece el proceso de mineralización.

### **5.3.2.3. Purificación de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos y determinación del Índice de Humificación HR<sub>2</sub>**

Con el propósito de determinar el índice de humificación (HR<sub>2</sub>), los sobrenadantes extraídos de las tres muestras son purificados y liofilizados. Después de liofilizar tanto los AH como los AF se determina el contenido de carbono.

La resina de adsorción Amberlita XAD-16 utilizada en este caso para iniciar la **purificación de la fracción fúlvica**, tiene como base copolímeros de Estireno – Divinilbenceno, es de carácter hidrofóbico y de esta manera, los AF en estado iónico interactúan con esta resina, formando enlaces tipo  $\pi-\pi$ . Dicha resina es suspendida en agua desionizada, empacada en una columna de 25mL y previamente activada con 50 mL de NaOH 0.7 N, luego se lava con agua desionizada, hasta obtener el mismo valor de pH del agua desionizada. De esta manera la resina presenta una coloración blanca.

Cuando se pasa la FF se observa que la resina toma un color amarillento, indicando que hay sustancia retenida, separando así los AF de las sales provenientes de los extractantes. Una vez retenidos los AF se procede a eluirlos con 50 mL de NaOH 0.7 N, quedando el eluido en forma de fulvatos de sodio únicamente. Este eluido se pasa a través de la resina de intercambio catiónico (Rexin 101H), empacada en una columna de 25 mL previamente activada con HCl

1N y lavada con agua desionizada hasta obtener nuevamente el pH del agua. Estos fulvatos son eluidos posteriormente con 50mL de HCl 0.1N. Los resultados de esta purificación se presentan en la tabla 15.

**Tabla 15. Conductividad y pH de la Fracción Fúlvica en el proceso de purificación**

	FF SIN TRATAMIENTO		ELUIDO ATRAVES DE AMBERLITA XAD-16		ELUIDO ATRAVES DE REXYN 101- H		ELUIDO ATRAVES DE MEMBRANA DE DIALISIS	
	I		II		III		IV	
	CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	pH	CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	pH	CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	pH	CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	pH
<b>M<sub>1</sub></b>	210.8	0.60	95.7	13.45	14.10	1.50	0.190	3.64
<b>M<sub>2</sub></b>	203.4	0.54	97.4	13.52	13.98	1.45	0.170	3.80
<b>M<sub>3</sub></b>	200.9	0.63	98.3	13.48	13.75	1.62	0.185	3.72
<b>Σ</b>	205.03	0.59	97.13	13.48	13.94	1.52	0.181	3.72

Como se aprecia en la tabla15, inicialmente la FF presenta una alta conductividad y un pH fuertemente ácido debido a la extracción con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado con el cual se separaron los AH. Cuando esta fracción se pasa a través de la resina de adsorción Amberlita XAD-16, hay una fuerte disminución de la conductividad, así como un elevado incremento en el valor de pH, estos valores indican que realmente hubo un proceso de eliminación de las sales presentes en esta fracción. El eluido alcalino de esta fracción en forma de fulvatos de sodio, posteriormente pasado a través de la resina de intercambio catiónico da como resultado una disminución más fuerte de su conductividad, que indica la eliminación de sales de sodio de la FF, quedando nuevamente en forma de verdaderos AF con valores de pH fuertemente ácidos debido a la elución con HCl.

Sin embargo, para poder liofilizar los AF es necesario eliminar algunas sales que todavía se encuentran en el extracto y el HCl sobrante, esto se hace a través de una membrana de diálisis de 3500 daltons, obteniéndose una solución de AF con una mínima conductividad, aún cuando su valor es superior al del agua desionizada (0.05), debido a la presencia de algunos cationes presentes en el abono. De igual forma se obtiene un valor de pH de 3,7 inferior al del agua, por la presencia de grupos carboxílicos y fenólicos que le producen acidez. De esta manera se puede asegurar que hubo un proceso de extracción y purificación al menos parcial de estos compuestos, resultados que concuerdan con los reportados por Dávila et al (2002) <sup>(63)</sup>. Luego de la purificación, los AF obtenidos presentan una coloración amarillenta característica, como se puede apreciar en la figura 32.

**Figura 32. Fotografía de los Ácidos Fúlvicos Purificados**



Según Stevenson et al (1989) <sup>(64)</sup> las SH usualmente son extraídas conjuntamente con componentes minerales como sales, óxidos y arcillas. Pero otros constituyentes orgánicos como proteínas y carbohidratos pueden extraerse, ya que se encuentran unidas a las SH por enlaces covalentes. Teniendo en cuenta estas consideraciones se procede a **purificar los AH** obtenidos con el fin de eliminar o disminuir la fracción mineral extraída con dichos compuestos.

Para ello, los AH obtenidos a partir de los extractos de tetraborato, pirofosfato e NaOH, son sometidos a continuas precipitaciones con HCl y redisoluciones de NaOH, con el fin de eliminar tanto las impurezas inorgánicas como orgánicas. La solución de AH se somete a diálisis para eliminar el NaOH midiendo el valor de pH antes y después de dicho proceso, cuyos resultados se presentan en la tabla 16. El tiempo medio para la diálisis es de 96 horas. En dicha tabla se aprecia que se pudo eliminar el NaOH en el proceso de diálisis puesto que el valor del pH es de carácter ácido proveniente de los AH. Luego de realizar la diálisis se liofiliza la fracción obtenida adquiriendo los AH purificados como se muestra en la figura 33.

**Tabla 16. Resultados de la purificación de los Ácidos Húmicos**

	pH de AH en NaOH 0.1N	pH de AH después de diálisis
MUESTRA	I	II
M <sub>1</sub>	13.40	3.24
M <sub>2</sub>	13.28	3.28
M <sub>3</sub>	13.34	3.30
PROMEDIO	13.34	3.27

**Figura 33. Fotografía de los Ácidos Húmicos Purificados**



➤ **Determinación del Índice de Humificación  $HR_2$**

En la tabla 17 se presentan los resultados de los porcentajes de C de AH y AF purificados.

**Tabla 17. Porcentaje de Carbono de Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos purificados y valor del Índice de Humificación  $HR_2$**

MUESTRA	PARAMETROS		
	% CAF	% CAH	$HR_2$
$M_1$	0.91	1.85	2.03
$M_2$	0.97	1.91	1.97
$M_3$	1.04	1.97	1.89
<b>PROMEDIO</b>	0.97	1.91	1.96

En dicha tabla se aprecia que el contenido de C de AH es superior al de AF, con un valor de  $HR_2$  superior a 1, por lo tanto se deduce un alto grado de humificación, como se mencionó anteriormente con estas mismas sustancias sin purificar.

Si se compara los valores del %C de los AF ya purificados con los %C de la FF (tabla 14 y 17) se observa que los %C en esta fracción disminuyen después de la purificación en 1.4 veces. Igualmente disminuye el %C de los AH purificados con respecto a los no purificados en 1.2 veces, lo que indica que no todo el carbono evaluado en las dos fracciones sin purificar corresponde al carbono de AH y de AF

existiendo así carbono perteneciente a moléculas como carbohidratos (monosacáridos, oligosacáridos, polisacáridos), proteínas, péptidos, ácidos nucleicos, grasas, ceras entre otros y por lo tanto estos resultados indican la eficiencia de la purificación.

En cuanto al **índice de humificación HR<sub>2</sub>** es superior al índice de humificación HR<sub>1</sub> en un 12% mostrando nuevamente la eficiencia en el proceso de purificación, siendo este dato más indicativo del verdadero proceso de humificación ocurrido durante el tiempo de compostaje. Su valor superior a 1 indica nuevamente un alto grado de humificación. Comparando este índice con los reportados por Arango et al (1999)<sup>(65)</sup>, Bravo et al (2001)<sup>(66)</sup>, Inbar et al (1990)<sup>(67)</sup> sigue siendo inferior, sugiriendo que aún no ha terminado el proceso de humificación durante el tiempo de compostaje.

#### 5.3.2.4 Determinación de la relación de densidades ópticas entre 465 y 665nm (Relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>)

Para continuar con la evaluación del proceso de humificación es conveniente determinar la relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>, relación de las densidades ópticas o de absorbancia a 465 y 665nm de soluciones diluidas de AH y AF purificados. De acuerdo a **Kononova et al (1996)**<sup>(68)</sup>, quien describe, que la magnitud de la relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> se relaciona con el grado de condensación, una relación baja es indicativo de un alto grado de condensación de componentes fúlvicos aromáticos, por otro lado, un valor alto refleja un bajo grado de condensación e infiere la presencia de grandes porciones de estructuras alifáticas. Los resultados se describen en la tabla 18.

**Tabla 18. Relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> de los Ácidos Húmicos y Ácidos Fúlvicos purificados**

MUESTRA	ACIDOS HUMICOS			ACIDOS FULVICOS		
	ABSORBANCIA 465nm	ABSORBANCIA 665nm	E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	ABSORBANCIA 465nm	ABSORBANCIA 665nm	E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>
<b>M<sub>1</sub></b>	0.314	0.067	4.69	0.324	0.038	8.5
<b>M<sub>2</sub></b>	0.310	0.066	4.70	0.306	0.037	8.2
<b>M<sub>3</sub></b>	0.313	0.067	4.67	0.319	0.039	8.1
<b>PROMEDIO</b>	0.312	0.067	4.68	0.316	0.038	8.30

Como se observa en la tabla 18 la relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> para los AF es superior a la de AH, indicando que su estructura tendría menor grado de polimerización y

condensación o sea menor complejidad de las moléculas, mayor presencia de estructuras alifáticas y por lo tanto menor peso molecular. Mientras que la estructura de los AH presenta mayor complejidad, puesto que tendría mayor grado de condensación y por lo tanto mayor contenido de estructuras aromáticas con respecto a las alifáticas. En trabajos reportados por Arango et al (1999) <sup>(69)</sup> indican una relación  $E_4/E_6$  de 6.88 para AH provenientes del compostaje de residuos de cosecha de crisantemo en un período de 150 días, Senesi et al (1992) <sup>(70)</sup> en cambio reporta valores de esta relación para AH de 7.2 y 8.6 extraídos de estiércol, indicando que en estos procesos el proceso de humificación ha sido menor que en el caso de la Planta los Arrayanes, en donde las estructuras químicas de sus AH serían altamente condensadas y/o polimerizadas. De acuerdo a **Kononova et al (1996)** <sup>(71)</sup>, los AH tienen valores de esta relación cercanos a 4 para AH, y para AF el valor es superior a 6, por lo tanto los valores encontrados para los AH y para AF en este caso estaría dentro del valor teórico reportado por este autor y coinciden con los datos reportados por Mosquera et al (2006) <sup>(72)</sup> y por Solarte et al (2006) <sup>(73)</sup>.

Sin embargo la información que proporciona la relación  $E_4/E_6$  debe ser confirmada mediante las bandas características de los espectros de IR tomados a las tres muestras de AH purificados y AF purificados.

En base a esto, con el análisis que se realizará a continuación de los espectros IR, se verificará que la relación  $E_4/E_6$  corresponde a los AH y AF, es decir se espera que los espectros IR presenten bandas características de estas sustancias. Este planteamiento se basa en la comparación del valor de  $E_4/E_6$  (4.64) y el análisis de IR para AH realizado por Mosquera et al (2006) <sup>(74)</sup> sobre la estructura de los AH de un suelo andisol en el departamento del Cauca, para los AF la comparación de la relación  $E_4/E_6$  (10) se basa al valor hallado por Solarte et al (2006) <sup>(75)</sup>, los IR se compararon con los reportados por Dávila et al (2002). <sup>(76)</sup>

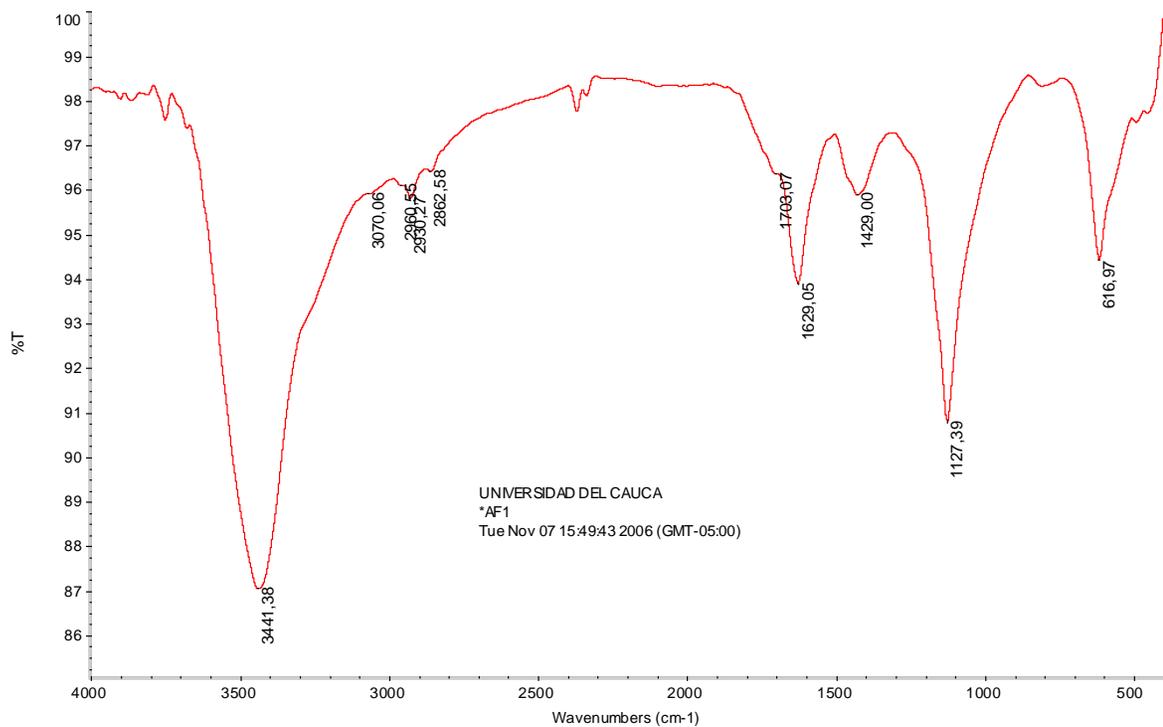
### **5.3.2.5 Análisis IR de los Ácidos Fúlvicos y Ácidos Húmicos**

Durante el proceso de compostaje se forman las sustancias similares a las húmicas en un proceso denominado neoformación llevado a cabo por bacterias, hongos y actinomicetos presentes en los propios residuos los cuales degradan grandes macromoléculas como las proteínas, carbohidratos, lignina, grasas entre otras. Es decir que ocurre un proceso similar al ocurrido en el suelo a diferencia de que en este, el proceso es mucho más largo y se obtiene por polimerización de fragmentos de macromoléculas AH y AF.

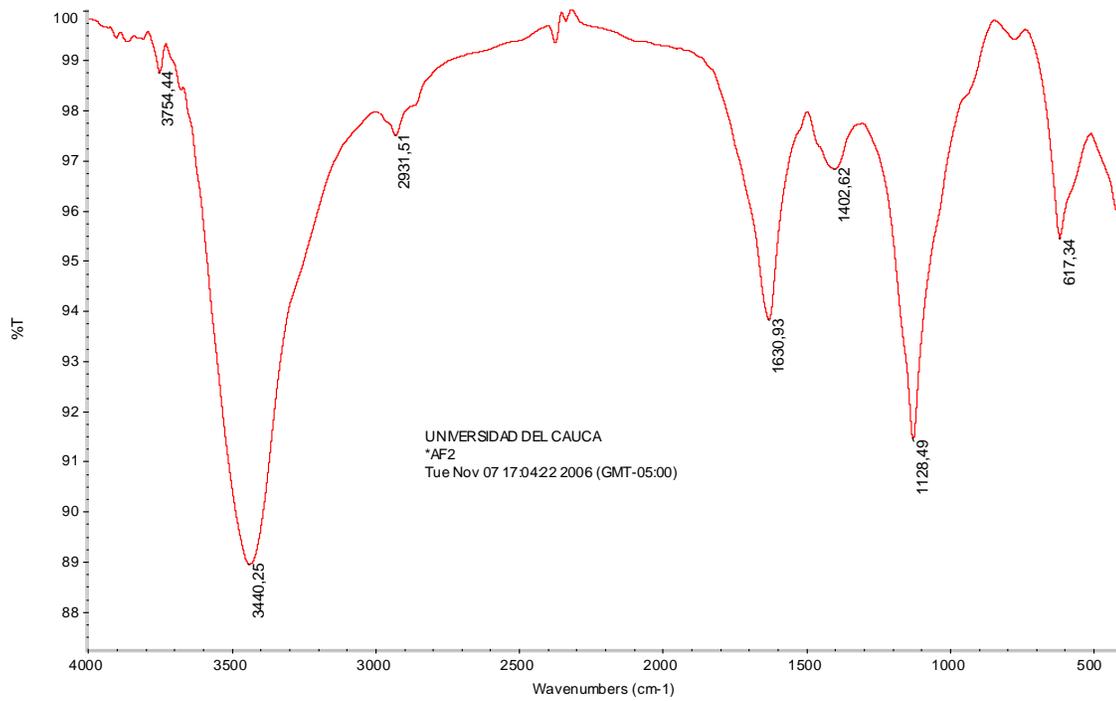
Las SH extraídas del compost están conformadas por una variedad de moléculas, no son un único compuesto químicamente, por lo tanto las bandas de absorción corresponden a un conglomerado de moléculas.

Las figuras 34, 35 y 36 muestran los espectros de cada muestra para los AF, se puede apreciar que no hay diferencia apreciable entre cada uno de ellos, indicando así que las tres muestras se pueden considerar como réplicas del abono. Iguales resultados se muestran en los otros análisis reportados anteriormente.

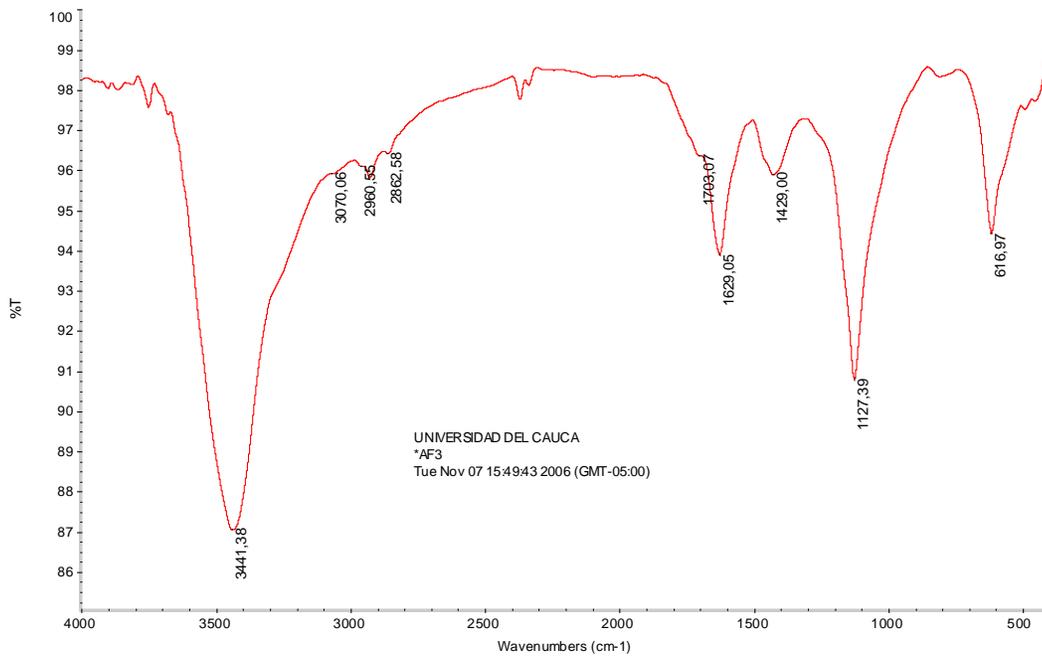
**Figura 34. Espectro IR de los Ácidos Fúlvicos M<sub>1</sub>**



**Figura 35. Espectro IR de los Ácidos Fúlvicos M<sub>2</sub>**



**Figura 36. Espectro IR de los Ácidos Fúlvicos M<sub>3</sub>**



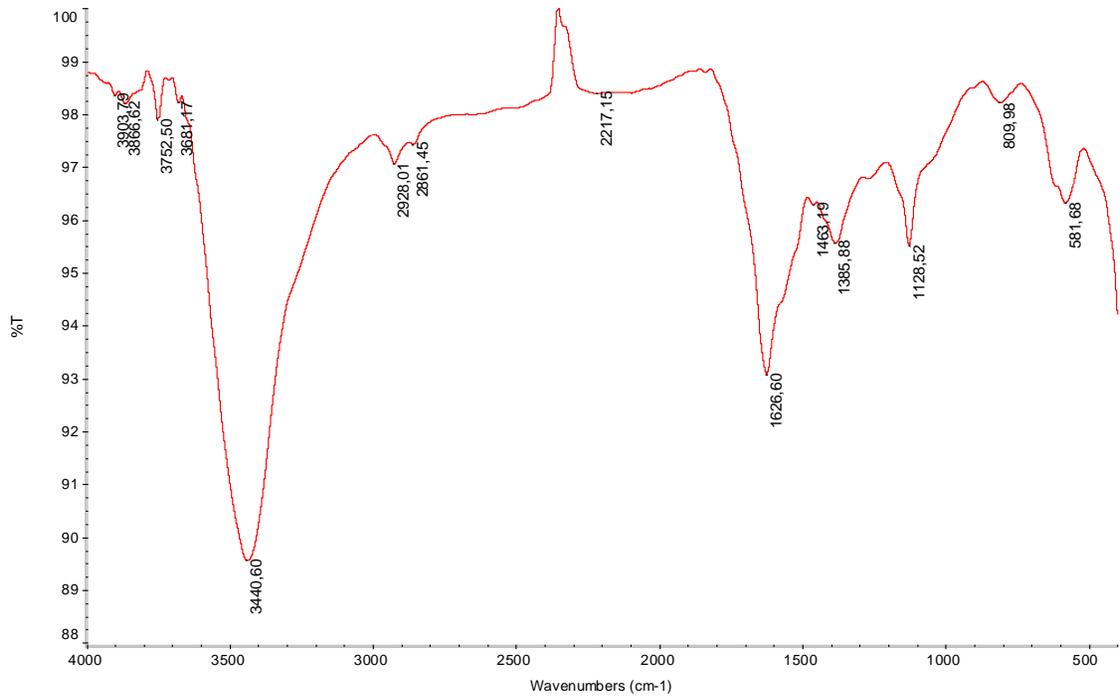
Las principales bandas de absorción de los espectros de las sustancias similares a los AF en las 3 réplicas se presentan a continuación.

<b>REGION</b>	<b>BANDAS DE ABSORCION CARACTERISTICAS</b>
3307-3440cm <sup>-1</sup>	Se presenta una tensión de grupos OH alcohólico con enlace probablemente de H intermolecular que corresponde al sistema polimérico; banda de absorción ancha y fuerte; también pueden aparecer en región de N-H libre asociado por enlaces de H, la cual puede ser solapada.
2924-2950cm <sup>-1</sup>	Estiramiento asimétrico de C-H saturado, mostrando clara evidencia de estructuras alifáticas como CH <sub>3</sub> y CH <sub>2</sub> , lo que confirma que a 1380-1480 donde hay flexión de CH de cadenas cortas.
2850-2866cm <sup>-1</sup>	Tensión C-H, estiramiento simétrico de C-H saturados de estructuras alifáticas CH <sub>2</sub> .
1623-1651cm <sup>-1</sup>	Tensión C=C de sistema conjugado (aromático), en diversas intensidades y/o estiramiento asimétrico de COO <sup>-</sup> .
1383-1485cm <sup>-1</sup>	Deformación asimétrica de enlaces CH <sub>3</sub> y CH <sub>2</sub> .
1130-1164cm <sup>-1</sup>	Estiramiento de C-OH alifáticos.
612-674cm <sup>-1</sup>	Tensión de alquenos conjugados.

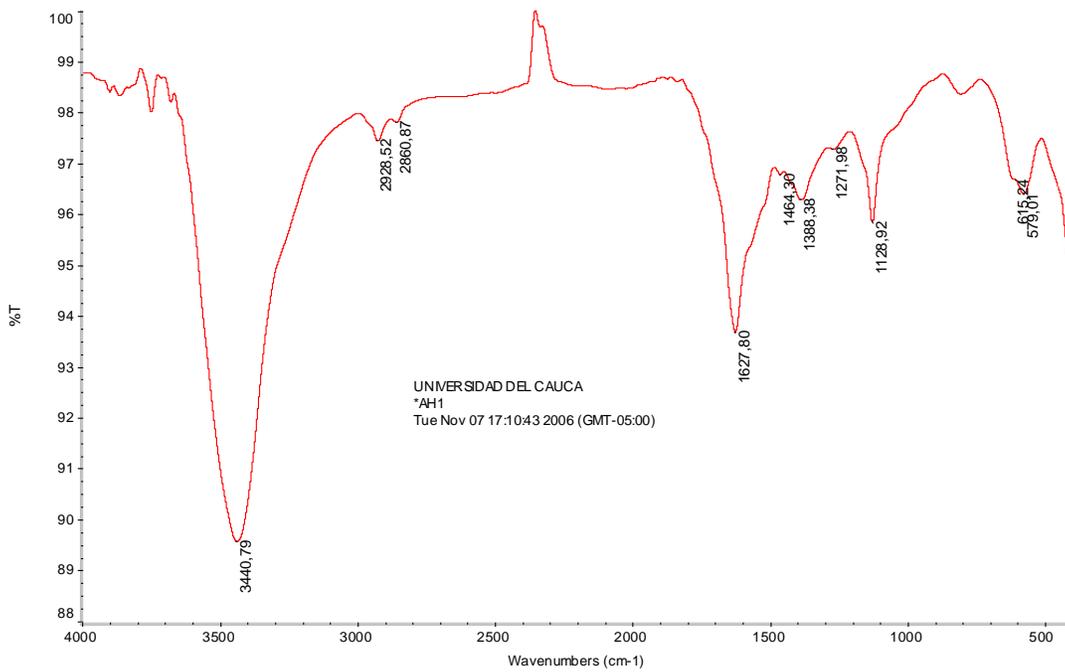
Se observa que predominan bandas correspondientes a estructuras alifáticas, concordando así con los resultados correspondientes a la relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> en donde se muestra poca condensación de las moléculas de los AF.

Las figuras 37, 38 y 39 muestran los espectros de cada muestra para los AH, se puede apreciar de igual manera que en los AF, que no hay diferencia apreciable entre cada uno de ellos, indicando así que las tres muestras se pueden considerar como réplicas del abono. Iguales resultados se muestran en los otros análisis reportados anteriormente.

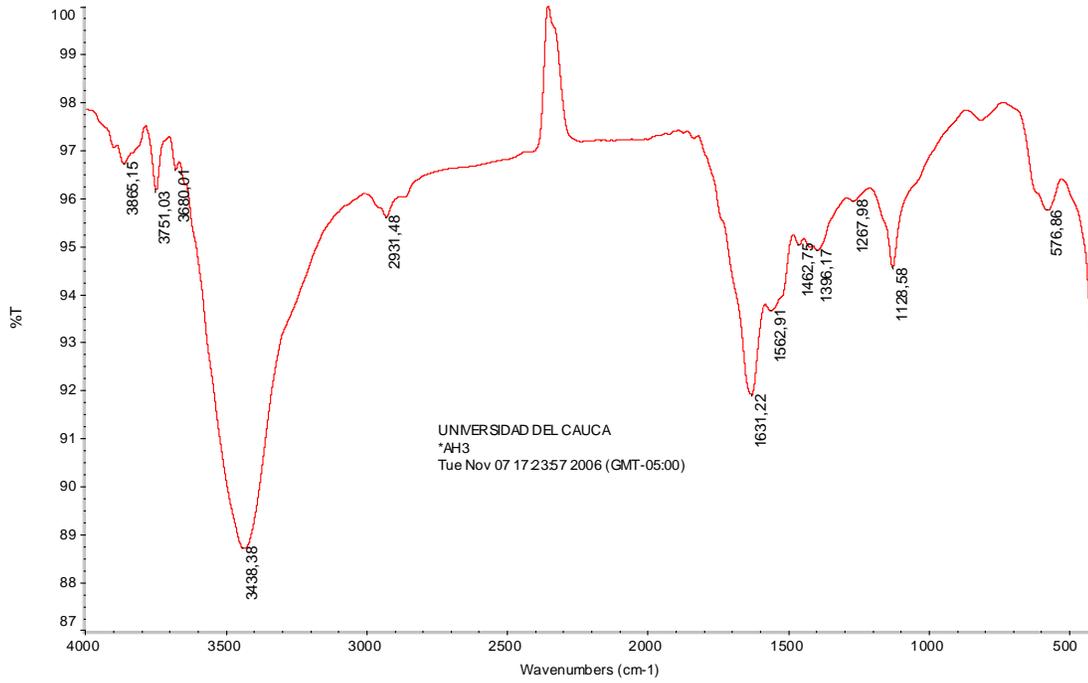
**Figura 37. Espectro IR de los Ácidos Húmicos M<sub>1</sub>**



**Figura 38. Espectro IR de los Ácidos Húmicos M<sub>2</sub>**



**Figura 39. Espectro IR de los Ácidos Húmicos M<sub>3</sub>**



Las principales bandas de absorción de los espectros IR de cada una de las 3 muestras M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub> de las sustancias similares a los AH son las siguientes:

**REGION**

**BANDAS DE ABSORCION CARACTERISTICAS**

2930-2850 y 1464-1460cm<sup>-1</sup>

Absorción de grupos alifáticos principalmente estiramiento asimétrico de C-H saturado, presentando evidencia de de estructuras alifáticas como CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub> que se confirman a 1338 donde existe flexión de C-H de cadenas cortas.

3650-3200cm<sup>-1</sup>

La banda aguda que se presenta en esta región, es debida a una tensión de grupos OH polimérico. Debida a puentes de hidrógeno H intramoleculares. También se presenta absorción por parte por vibración de tensión antisimétrica y simétrica por parte de grupos N-H.

1620-1680cm <sup>-1</sup>	Banda característica de C=C conjugado con anillo aromático, de intensidad media, y/o estiramiento antisimétrico COO <sup>-</sup> .
1390-1370cm <sup>-1</sup>	Vibración de torsión simétrica de grupos -CH <sub>3</sub> y -CH <sub>2</sub> .
1545-1562cm <sup>-1</sup>	Banda para la vibración de tensión de C=C de anillo aromático, sales de aminas o amidas. Esta banda se presenta generalmente para la muestra M <sub>3</sub> . En las muestras M <sub>1</sub> y M <sub>2</sub> esta banda se encuentra solapada.
1125-1000cm <sup>-1</sup>	Vibración de tensión C-O, en agrupamiento C-OH.
784-842cm <sup>-1</sup>	Vibraciones de C-H aromático fuera del plano.
612-674 cm <sup>-1</sup>	Tensión de alquenos conjugados.

Se puede concluir que al contrario del caso de los AF, en este caso predominan bandas correspondientes a compuestos aromáticos y por lo tanto a estructuras más conjugadas concordando también con la relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> en donde se muestra mayor condensación y por lo tanto estructuras más conjugadas para estos AH. Si se comparan los espectros de IR obtenidos para los AH purificados del compost, con los obtenidos para AH de un compost de residuos de cosecha Arango et al (1999) <sup>(77)</sup>, se aprecia que existen las mismas bandas. Igualmente si se comparan las bandas de los espectros IR de AF de este compost con los reportados por Dávila et al (2002) <sup>(78)</sup> para AF de un suelo andisol del departamento del Cauca, existe alta similitud entre ellos.

## 6. CONCLUSIONES

- ✓ El sistema estudiado cumple las cuatro etapas necesarias para un adecuado proceso de compostaje; mesofílica, termofílica, de enfriamiento y maduración.
- ✓ Factores físicos y químicos como la humedad, pH, conductividad eléctrica, densidad, capacidad de retención de agua, cenizas, MO, pérdidas por volatilización, relación C/N, son óptimos para el abono según la NORMA ICONTEC.DE-204/02. No obstante el nivel de MO inicial es inferior al óptimo para iniciar el proceso de compostaje.
- ✓ El abono es fuente importante de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, hierro y zinc indispensables para el suelo y las plantas.
- ✓ El nivel de calcio es elevado, implicando esto una alta relación Ca/Mg induciendo así a una deficiencia de magnesio.
- ✓ El contenido de cobre y manganeso es alto, pero esto no implica toxicidad debido a su quelatación por la MO, de acuerdo a estudios realizados por Boid et al (1981) <sup>(79)</sup>.
- ✓ El índice de humificación  $HR_1$ , indica alto grado de humificación, pero es inferior al obtenido mediante este mismo proceso para otros materiales, indicando que el proceso de humificación aún no ha terminado.
- ✓ El índice de humificación  $HR_2$ , es superior al  $HR_1$ , indicando un alto grado de humificación y una eficiencia en el proceso de purificación de SH.
- ✓ La relación  $E_4/E_6$  para los AF es superior a la de los AH. Por lo tanto la estructura de los AH presenta mayor complejidad que la de los AF. Esto es confirmado mediante los espectros IR, en donde se aprecia que para los AF predominan bandas características para estructuras alifáticas y para los AH prevalecen bandas características de estructuras aromáticas. De esta información se concluye que los materiales compostados presentan un alto grado de humificación.
- ✓ Las réplicas tomadas para determinar todos los parámetros analizados durante el proceso de compostaje como en el bioabono, presentan una baja desviación estándar del promedio, indicando que el proceso es uniforme a lo largo de la pila.

- ✓ De acuerdo a los parámetros técnicos establecidos por ICONTEC en la norma DE 204/02 y científicos establecidos por la Sociedad Internacional de SH el compost obtenido se clasifica como un **Abono o Fertilizante Orgánico**.

## RECOMENDACIONES

- ✓ El tiempo de compostaje debe incrementarse puesto que de acuerdo a los índices de humificación  $HR_1$  y  $HR_2$ , el compost obtenido en este periodo es inmaduro.
- ✓ Es necesario formular este abono con una fuente de magnesio para aplicarlo al suelo y suplir su deficiencia.
- ✓ Se sugiere reemplazar la cal agrícola ( $CaCO_3$ ) por cal dolomita ( $CaCO_3.MgCO_3$ ) en el proceso de compostaje.
- ✓ Se debe disminuir el tamaño de las partículas de los materiales a 2.7 cm para lograr un mejor proceso de degradación de la Materia Orgánica y mejorar su aprovechamiento por los microorganismos.
- ✓ Al inicio del proceso es importante adicionar una fuente de MO, para incrementar su porcentaje a nivel óptimo, esta deficiencia podría suplirse si la tierra negra y el estiércol se adicionan al inicio del proceso y no al final.
- ✓ Tener conciencia que el aprovechamiento de recursos desechados es una actividad que genera impacto ambiental y ecológico, es decir que se debe trabajar reconociendo factores importantes para el desarrollo de esta actividad como: la exposición a gases tóxicos, residuos sólidos peligrosos, agentes y microorganismos patógenos e infecto-contagiosos. Sin embargo, para disminuir estas influencias ambientales y riesgos profesionales es importante reconocer los factores y/o agentes de riesgo, la seguridad personal, el orden, aseo y organización del sitio de trabajo y el correcto manejo de todos los recursos físicos existentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) ARANGO G, GONZALEZ H. Sustancias Húmicas Formadas durante la compostación de residuos de cosecha. En revista de Suelos Ecuatoriales. Vol. 29 No.1 1999. p. 32-34.
- (2) BRAVO, I. GIRALDO, E. ORTIZ, H. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la producción de bioabonos y especies menores peces. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. Departamento de Química. Popayán, Julio 2001. p. 2-5.
- (3) BRAVO, I. GIRALDO, E. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para uso agropecuario. En memorias del 1<sup>er</sup> encuentro nacional de investigadores en aprovechamiento de desechos agroindustriales.2003. Santiago de Cali. p. 48-59.
- (4) RIASCOS, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Segunda Edición. Monómeros Colombo-Venezolanos S.A, Santa fé de Bogotá. 1998. p. 372-377.
- (5) CEGARRA, J. 1983. Utilización y manejo de los lodos de aguas residuales urbanas con fines agrícolas. En: Suelos Ecuatoriales, Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Vol. XIII, No. 1.1999. p. 151-173.
- (6) BRAVO, I. GIRALDO, E, Op.cit., p.48-59
- (7) MATHUR, S.P, DINEL, H., OWEN, G, SCHNITZER, M., and DUGAN, J. 1993. Determination of compost Biomaturity. II. Optical Density of Water Extracts of composts as a Reflection of their Maturity. Biological Agriculture and Horticulture. Vol. 10. p. 87-108
- (8) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Biotransformación de algunos residuos agroindustriales y evaluación de su proceso de humificación. En: Suelos Ecuatoriales, Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Vol. 31, No. 2. 2001. p. 146-151.
- (9) PLANAS, A. Correlación de Variables físico-químicas en el Proceso de Compostaje y su Impacto en Programas de Fertilización. Conferencia presentada en el Seminario "Materiales Orgánicos en la Agricultura". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Medellín, Marzo 27 y 28. 2003. p. 1 – 10.

- (10) STEVENSON, F. J. y E. T. ELLIOT. 1989. Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter. En: Coleman, D. C., M. Oades y G. Uehara (eds.), Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. University of Hawaii Press, Honolulu, Hawaii USA. p. 173-199.
- (11) BRAVO, I. GIRALDO, E, Op.cit., p.54.
- (12) CEGARRA, J. Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. Memorias del VII congreso colombiano de la ciencia del suelo. 1994. Bucaramanga. p. 22-30.
- (13) ZAMBRANO, J. Compostaje. De memorias Curso de abonos y sustratos orgánicos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Extensión Universitaria. Marzo 1996. p. 36-50.
- (14) MUÑOZ G. Gaby M. 2003. Evaluación de la retención de aluminio por dos Fuentes de Materia Orgánica y su Correlación con el grado de Humificación. Popayán Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 45-56.
- (15) GOMEZ, Jairo A. Fertilidad de los Suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 1995. p. 307-309.
- (16) GUERRERO R. Ricardo, Eficiencia de la Fertilización en la Agricultura de Colombia. Conferencia presentada en el Seminario "Manejo Productivo de Suelos para Cultivos de Alto Rendimiento. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo". Comité Regional del Valle del Cauca. Palmira, Septiembre 27 y 28. 2001. p. 120-129.
- (17) MATHUR, S.P, DINEL, H., OWEN, G, SCHNITZER, M., and DUGAN, J, Op.cit., p.89.
- (18) BRAVO, I. GIRALDO, E, Op.cit., p. 50-51.
- (19) Edafología. Ciencias ambientales. Propiedades del suelo. Propiedades físico-químicas. Intercambio iónico. Available from Internet <http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL4FSCOHumificacion.htm> Actualizada 13 de Mayo 2003.
- (20) Soil Science Society of America. Glossary of soil science terms. Soil Science Soc. Am Proc.1965. p 42.
- (21) MALAGON, Dimas. LLINAS, Rubén. CHAMORRO, Clara. Suelos de Colombia. Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Santa fé de Bogotá: IGAC, 1995. p 107-109.

- (22) MIRANDA V José Carlos, LAS SUSTANCIAS HUMICAS. En Memorias Curso de Abonos y Sustratos Orgánicos. Palmira Marzo 1996 Pág. 6-10.
- (23) Edafología. Ciencias ambientales. Propiedades del suelo. Propiedades físico-químicas. Intercambio iónico. Available from Internet [www. Unex.e/edafo/ECAL5#ScoHumificacion.htm](http://www.Unex.e/edafo/ECAL5#ScoHumificacion.htm). Actualizada 13 de Mayo 2003.
- (24) DORADO, E. ALMENDROS, G. Extracción y caracterización de las sustancias húmicas en las fracciones físicas del suelo. Real Sociedad Española de la Historia Natural.p. 5-28 .1979.
- (25) Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. Quinta edición. Subdivisión de Agrología. Santa fé de Bogotá. Colombia.1990. p. 455-499.
- (26) PEPICANO B, Arcadio. Tesis de grado. Evaluación de la capacidad de retención de aluminio por la materia orgánica humificada de un suelo del departamento del Cauca 2006. p 29.
- (27) MIRANDA V José Carlos, LAS SUSTANCIAS HUMICAS. En memorias Curso de Abonos y Sustratos Orgánicos. Palmira Marzo 1996. p. 1-3.
- (28) Edafología. Ciencias ambientales. Propiedades del suelo. Propiedades físico-químicas. Intercambio iónico. Available from Internet [http://www.infoagro.com/agricultura\\_ecologica/agricultura\\_ecologica14.asp](http://www.infoagro.com/agricultura_ecologica/agricultura_ecologica14.asp). Actualizada 13 de Mayo 2003.
- (29) MUÑOZ P, Berta I. Trabajo de grado. Extracción y caracterización de huminas de un suelo andisol del departamento del Cauca. 2002. p. 10.
- (30) MIRANDA V José Carlos, Op.cit., p.1-2.
- (31) PRIMAVESI, A Manejo Ecológico del suelo. El Ateneo. Buenos Aires. Quinta Edición. 1984. p. 94-118.
- (32) PEPICANO B, Arcadio, Op.cit., p.30.
- (33) MIRANDA V José Carlos, Op.cit., p. 1-3.
- (34) Edafología. Ciencias ambientales. Propiedades del suelo. Propiedades físico-químicas. Intercambio iónico. Available from Internet [http://www.infoagro.com/agricultura\\_ecologica/agricultura\\_ecologica14.asp](http://www.infoagro.com/agricultura_ecologica/agricultura_ecologica14.asp). Actualizada 13 de Mayo 2003.

- (35) BARRETO, R. Norma Técnica Colombiana. En: Suelos Ecuatoriales, Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Vol. 32, No. 1. 2002. p. 33-43.
- (36) BRAVO, I. GIRALDO, E. 2003. Manual de prácticas de química agrícola: análisis de suelos. Universidad del Cauca. p. 9-77.
- (37) BRAVO, I. GIRALDO, E, Op.cit., p. 52.
- (38) DAVILA, J. 2002. Caracterización preliminar de ácidos fúlvicos de dos suelos Colombianos. Popayán Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 12-40.
- (39) MOSQUERA, C. 2006. Caracterización preliminar de la estructura de los ácidos húmicos de un suelo andisol del departamento del Cauca. Popayán Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 43-56.
- (40) MUÑOZ, A. R. 1994. Los abonos orgánicos y su uso en la agricultura. En: Fertilidad de suelos. Diagnóstico y Control. Francisco Silva Mojica (ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. p. 293-304.
- (41) [www.infroagro.com](http://www.infroagro.com)
- (42) BRAVO, I. GIRALDO, E, Op.cit., p.52-54.
- (43) WILLSON, G.B. PARR, J.F. SIKORA, L.J. Experiences with organic waste composting in developing countries. Memorias. El reciclaje de materia orgánica en la Agricultura de América Latina.
- (44) BRAVO, I. GIRALDO, E, Op.cit., p.48-59.
- (45) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Op.cit., p. 146-151.
- (46) KIEHL, E.J. 1993. Fertilizantes Organominerales. Edi Vao do autor.
- (47) NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (ICONTEC). Parámetros a caracterizar (%) en peso y otros requerimientos para abonos orgánicos, organominerales y enmiendas orgánicas. Memorias. Seminario. Medellín; Marzo 27,28 y 29. 2003.
- (48) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Op.cit., p. 146-151.
- (49) MEDINA, F. 2004. Evaluación de la calidad y madurez de cuatro abonos orgánicos y su valoración agronómica sobre un cultivo de maíz híbrido amarillo (*Zea mays* L). Popayán Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 62.
- (50) PEPICANO B, Arcadio. Op.cit., p. 29.

- (51) KIEHL, E.J. 1993. Fertilizantes Organominerais. Edi Vao do autor.
- (52) FLORENSA, P. MARTINEZ, J. Horticultura y materia orgánica. Departamento técnico productos Labin. Marzo 1991, p 56-58.
- (53) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Op.cit., p. 146-151.
- (54) KIEHL, E.J. 1993. Fertilizantes Organominerais. Edi Vao do autor.
- (55) MEDINA, F. Op.cit., p. 62.
- (56) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Op.cit., p. 146-151.
- (57) ARANGO G, GONZALEZ H. Op.cit., p 32-34.
- (58) KIEHL, E.J. 1993. Fertilizantes Organominerais. Edi Vao do autor.
- (59) BOID, S.A; SOMMERS, L.E; NELSON, D.W. Cooper (II) and Iron (III) complexation by the carboxylate group of humic acid. Soil Sciencie Suc. 1981 p. 395.
- (60) CEGARRA, J. Op.cit., p. 22-30.
- (61) KIEHL, E.J. 1993. Fertilizantes Organominerais. Edi Vao do autor.
- (62) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Op.cit., p. 146-151.
- (63) DÁVILA, J, Op.cit p. 61-63.
- (64) STEVENSON, F.J. 1982. Humus chemistry: genesis, composition reactions. John Wiley. New York
- (65) ARANGO G, GONZALEZ H. Op.cit p. 32-34.
- (66) BRAVO, I. GIRALDO, E. GARCES, P. Op.cit., p. 146-151.
- (67) INBAR, Y. CHEN, Y. ANDHADAR, Y. 1990. Humic substances formed during composting of organic matter. Soio Sci. AMER. Journal. 54. p. 1316-1323.
- (68) KOKONOVA, M.M. 1966. Soil organic matter. Pergamon Press, Oxford. p. 400-404.
- (69) ARANGO G, GONZALEZ H. Op.cit p. 32-34.

(70) SENESI, N; BRUNETTI, G. 1992. Chemical and physico-chemical parameters for quality evaluation of humic substances produced during composting. The science of Composting. European commission International Symposium. Blackie Academic & Professional. London. y Bruneti (1992).

(71) KOKONOVA, M.M. 1966. Op.cit p 400-404.

(72) MOSQUERA, C, Op.cit p. 43-56.

(73) SOLARTE, M 2006. Determinación voltamperométrica de  $\text{Cu}^{2+}$  en un suelo andisol del Cauca y evaluación del  $\text{Cu}^{2+}$  unido a la fracción de ácidos fúlvicos. Popayán Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. p. 49.

(74) MOSQUERA, C , Op.cit p. 43-56.

(75) SOLARTE, M. Op.cit p. 49.

(76) DÁVILA, J, Op.cit p. 61-63.

(77) ARANGO G, GONZALEZ H Op.cit p. 32-34.

(78) DÁVILA, J, Op.cit p. 61-63.

(79) BOID, S.A; SOMMERS, L.E; NELSON, D.W. Cooper (II) and Iron (III) complexation by the carboxylate group of humic acid. Soil Sciencie Suc. 1981 p. 395.